

Aus dem
Med. Zentrum für Nervenheilkunde
der Philipps-Universität Marburg

Geschäftsf. Direktor:
Prof. Dr. med. Jürgen-Christian Krieg

Abteilung für Neuroradiologie
Direktor: Prof. Dr. med. Siegfried Bien

Neuronale Korrelate der Melodie- und
Rhythmuswahrnehmung!
Eine funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie-
Untersuchung.

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der gesamten Medizin dem
Fachbereich Humanmedizin der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Thomas Schröder
aus Altena (Westfalen)
Marburg, 2004

**Angenommen vom Fachbereich Humanmedizin
der Philipps-Universität Marburg
am 02. September 2004.**

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Prof. Dr. B. Maisch

Referent: Prof. Dr. S. Bien

Koreferentin: Frau Prof. Dr. R. Berger

1. INHALTSVERZEICHNIS

1. Inhaltsverzeichnis

2. Abkürzungen

3. Zusammenfassung

3.1 Hintergründe

3.2 Methodik

3.3 Ergebnisse

4. Einleitung

4.1 Das Gehirn und Musik

4.2 Allgemeine anatomische und neuronale Grundlagen des Hörens

4.3 Amusien – die Unfähigkeit Musik wahrzunehmen

4.4 Trennung von Melodie- und Rhythmuswahrnehmung?

5. Material und Methoden

5.1 Die Versuchspersonen

5.2 Warum Musiker?

5.3 Die Geräte und Einstellungen

5.3.1 Der Kernspintomograph

5.3.2 Das Computerprogramm zur Reizdarbietung

5.3.3 Die musikalischen Reize

5.4 Ablauf des Versuchs

5.5 Auswertung der Daten

6. Ergebnisse

- 6.1 Allgemeines lineares Modell: einzelne Versuchspersonen
- 6.2 Allgemeines lineares Modell: Gruppenauswertung
- 6.3 Vergleich der Bedingungen

7. Diskussion

8. Literaturverzeichnis

9. Anhang

- 9.1 Notenbeispiele
- 9.2 Verzeichnis der akademischen Lehrer
- 9.3 Danksagung

2. Abkürzungen

BOLD	blood oxygenation level dependent
CCT	Cranielle-Computer-Tomographie
EPI	Echo-Planar-Imaging
f-MRT	funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie
G.	Gyrus (Hirnwindung)
GLM	general linear model = allg. lineares Modell
ggf.	gegebenenfalls
i.e.	das ist
MRT	Magnet-Resonanz-Tomographie
PCT	Positronen-Computer-Tomographie
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
TIA	Transitorische Ischämische Attacke
T1w	T1 gewichtet (longitudinale Relaxationszeit des MRT)
u.U.	unter Umständen
VP	Versuchsperson
VPn	Versuchspersonen
WN	white noise = Weißes Rauschen
z.B.	zum Beispiel

3. Zusammenfassung

3.1 Hintergründe

Selektive Ausfälle musikalischer Funktionen bei Patienten mit Hirnläsionen vor allem in temporalen Regionen (sogenannte Amusien) lassen vermuten, daß der Musikwahrnehmung spezifische kortikale Systeme zu Grunde liegen. Parallel zu Störungen der Sprache, können diese Beeinträchtigungen perzeptiver oder expressiver Natur sein. Allem Anschein nach können bei der Musikwahrnehmung verschiedene Subprozesse unterschieden werden. Eine Unterteilungsmöglichkeit ist die in analytische (lokale Verarbeitung von Intervallen und Rhythmus) versus ganzheitliche (globale Verarbeitung von Konturen und Metrum) Verarbeitungsweisen, die entsprechend der linken und rechten Hemisphäre zugeschrieben wurden. Außerdem sprechen neuropsychologische Befunde für die Trennung von Prozessen der Intervall- und Rhythmuswahrnehmung und von Prozessen der Kontur- und Metrumverarbeitung, wobei die Zuordnung zu den beiden Hemisphären nicht so eindeutig zu sein scheint (Peretz et al., 1994; Schuppert, Münte, & Altenmüller, 1997). Isabelle Peretz et al. konnten 1990 und 1994 eine Dissoziation zwischen Melodie- und Rhythmuswahrnehmung beobachten, und schlossen auf verschiedene neuronale Subsysteme für diese Qualitäten. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, mit Hilfe der f-MRT nach einem funktionellen, anatomischen Korrelat dieser Dissoziation zu suchen.

3.2 Methodik

In dieser Studie wurden 10 gesunde Laienmusiker untersucht, darunter 7 Männer und 3 Frauen im Alter von 23 bis 35 Jahren. In einem 1,5 Tesla MRT wurden musikalische Reize über Kopfhörer abgespielt. Aus einer Ausgangsmelodie wurden mit einem Musikprogramm 3 Variationen geschaffen, die jeweils eine neue Tonreihenfolge bei ursprünglichem Rhythmus und einen neuen Rhythmus bei originaler Tonreihenfolge sowie eine komplett randomisierte Version umfassten. Diese wurden in je 3 Messdurchgängen pro Proband in

unterschiedlichen Reihenfolgen vorgespielt. Die Versuchspersonen (VPn) sollten sich nur auf die Musik konzentrieren und dabei akzentuierte Töne zählen. In einer EPI Bold Sequenz wurden die funktionellen Daten erfaßt und mit einer hochauflösenden anatomischen T1 gewichteten (T1w) Aufnahme koregistriert. Mit dem Programm Brainvoyager 3.9 erfolgte die weitere Bearbeitung und statistische Auswertung des Datenmaterials. Es folgte eine Einzelanalyse der aktiven Voxelregionen bei allen VPn sowie eine Gesamtanalyse und acht verschiedene Kontraste der einzelnen Bedingungen auf dem Grund des Talairach/Tournoux Atlas.

3.3 Ergebnisse

Diese Arbeit war in der Lage die Leistungsfähigkeit der f-MRT zu zeigen und bestätigt die Rolle des primären Hörkortex für die Musikwahrnehmung. Die Bilder der Gruppenauswertung demonstrieren die relativ gute Auflösung von Hirnaktivitätsdarstellung und ergaben aktive Voxel in der Präzentralregion bds. sowie occipital in den Gyri orbitales und Gyri occipitales inf. et medii. In der Kontrastdarstellung der einzelnen Bedingungen konnten nur geringe Signifikanzniveaus erreicht werden, was den Nachweis spezialisierter Melodie- und Rhythmuszentren in Frage stellt. Die deutlichsten Aktivierungen fanden sich bei drei Kontrasten bei denen die Originalmelodie als Hauptbedingung galt. Hier wurden die Temporalregionen und ebenfalls die Präzentralregionen aktiviert. Weitere Untersuchungen mit verschiedensten Paradigmen sind nötig, um ein globaleres Verständnis der Musik und Rhythmuswahrnehmung zu gewinnen. Gesonderte Zentren für diese Qualitäten erscheinen fraglich.

4. Einleitung

4.1 Das Gehirn und Musik

„Ein menschliches Organ bemüht sich also, seinen eigenen Bau und seine eigene Funktion zu ergründen.“ schreibt Werner Kahle im Taschenatlas der Anatomie über Nervensystem und Sinnesorgane (Kahle, 2000). Wenn es um Methoden und Wege geht, die die Hirnforschung wahrnehmen muß, um etwas über das menschliche Cerebrum zu erfahren, gibt es vielfältige Ideen und Ansätze für Versuche und Experimente. Letztlich bleibt es aber unserem Gehirn überlassen, diese Informationen auch zu verstehen.

Bei allen Fähigkeiten, die unser Gehirn, aber auch unsere Sinnesorgane betreffen, stehen wir vor großen und meist sehr komplexen Zusammenhängen. Eine der wohl interessantesten und schönsten menschlichen Fähigkeiten ist das Musizieren und Musikhören. Wer kennt es nicht, wenn man im Konzert von Gänsehaut als Ausdruck einer emotionalen Beteiligung am Geschehen überrascht wird? Fragen werfen sich auf:

Wie kommt es dazu? Warum macht Musik mal fröhlich und mal traurig? Wie empfinden andere Völker unsere westliche Musik? Hören sie sie genauso wie wir? Welche Hirnareale übernehmen Aufgaben beim Entschlüsseln musikalischer Informationen? Warum ist jemand „musikalisch“ und ein anderer nicht? Oder ist der „Unmusikalische“ vielleicht doch „musikalisch“ und weiß es nur nicht?

Man bemerkt sehr schnell auf was man sich eingelassen hat, wenn sich diese Fragen im Vorfeld einer Doktorarbeit stellen. Wo also anfangen?

Musik ist in der Lage, in uns starke Emotionen zu wecken. Bedingung dafür ist allerdings, daß wir gut hören können bzw. das Organ, mit dem wir entschlüsseln was unser Ohr aufnimmt, einwandfrei funktioniert – das Gehirn. Sich der Frage zu nähern, wie es neurochemisch durch Musik zu Emotionen kommt, würde den Rahmen dieser Dissertation sprengen.

Es gibt, neben umfangreicher psychologischer Forschung, bereits funktionelle Untersuchungen mit Positronen Emissions Tomographie (PET), die diesen Aspekt von Musik mit Konsonanz- und Dissonanzparadigmen untersuchen und eine Aktivierung von paralimbischen und frontalen Hirnarealen als Ausdruck von emotionaler Beteiligung deuten (Blood, 1999).

4.2 Allgemeine anatomische und neuronale Grundlagen des Hörens

Es ist sinnvoll sich erst einmal der anatomischen Ebene der musikalischen Verarbeitung zu widmen: den neuronalen Vernetzungen und der Informationsübertragung vom Trommelfell und Innenohr zu den primären Hörzentren.

Die über das Trommelfell aufgenommenen Schallwellen z.B. eines Tones werden über die drei Mittelohrknöchelchen an das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr weitergegeben. Die inkompressible Perilymphe der Hörschnecke (Cochlea) gibt diese in die Scala vestibuli weiter. Dort wird die Reissner Membran (Membrana vestibularis) durch den Druck der Schallwellen eingedrückt. Der Ort dieser Impression ist durch ein Amplitudenmaximum der auf der Membran entstehenden Wanderwelle (von Bekesy, Nobelpreis 1961) vorgegeben und bei tiefen Frequenzen an der Spitze, bei hohen Frequenzen an der Basis der Cochlea lokalisiert. Die Theorie von der Wanderwelle ist nicht unbestritten geblieben, wurde aber oft bestätigt (Bekesy, 1970; Tonndorf, 1980; Greenwood, 1990). Schratzenstaller untermauerte die Richtigkeit der Theorie Bekesy's durch Hirnstamm-Audiometrien. Die basalen Anteile der Cochlea wurden gezielt durch Störgeräusche irritiert und Latenzverlängerungen bei den Hirnstammpotentialen festgestellt (Schratzenstaller, 2000). Es wurde postuliert, daß die Wanderwelle die gestörte Basalmembran nur verlangsamt passieren kann. Auch wurden eigene, in der Cochlea lokalisierte Regulationsmechanismen diskutiert (Johnstone, 1986). Eine Übersicht über die Entwicklung der Forschung zur auditiven Physiologie gibt eine Arbeit von Gitter und Preyer aus dem Jahre 1992.

Die aus der Wanderwellentheorie hervorgehende Folgerung ist eine Tonotopie, i.e. jede Frequenz hat eine eindeutige Zuordnung auf der Reissner Membran der Hörschnecke und damit zu bestimmten Sinneszellen.

Das unter der Membrana vestibularis befindliche Corti Organ, welches die Hörsinneszellen (Haarzellen) enthält wird durch die lokale Impression gereizt. Es befindet sich in einem eigenen häutigen Labyrinth, dem Ductus cochlearis (Endolymphraum), der durch Reissner Membran und Lamina basalis begrenzt wird. Die entstehenden elektrischen Impulse der Haarzellen werden an den Nervus cochlearis (Hörnerven) weitergegeben und über mehrere Verschaltungsstellen, sog. Ganglien an das Gehirn weitergeleitet. Ganglien finden sich in der Cochlea, der Medulla oblongata, den unteren Zweihügeln sowie der oberen Olive. Der größte Teil der Fasern kreuzt in den Trapezoidkernen der Medulla oblongata zur Gegenseite, wo die Hörbahn als Lemniscus lateralis zur Vierhügelplatte aufsteigt. Von den unteren Zweihügeln der Vierhügelplatte verlaufen die Fasern als Pedunculus colliculi inferiores zum Corpus geniculatum mediale, von wo sie als Hörstrahlung durch den postero-inferioren Teil der Capsula interna zum Temporallappen ziehen.

Die tonotope Ordnung bleibt auch auf den Verschaltungswegen zur primären Hörrinde im Schläfenhirn (Temporallappen) offenbar weitestgehend erhalten (Mohneke, 1983; Imig und Morel, 1985; Imig und Morel, 1985). Interessanterweise übernehmen die Neuronen aber auch eine Filterfunktion bei der Reizaufnahme und -verarbeitung. Scheinbar geschieht dies durch unterschiedliche Schwellen der Ansprechbarkeit auf einen Reiz. So fand man entsprechende Neurone bei Hühnern (Strohmann, 1995). Offenbar ist dies ein Schutzmechanismus gegen Reizüberflutung, der auch in anderen Hirnteilen schon beschrieben wurde v.a. im Thalamus. So könnte man z.B. die Fähigkeit zur selektiven Aufmerksamkeit nicht nur im auditorischen Bereich erklären, die es einem erlaubt ganz gezielt aus einem Gewirr von Stimmen genau diejenige heraus zu hören, die man hören will.

Die Annahme und der Nachweis, daß die primären Hörzentren sich im Temporallappen befinden, wurde schon früh diskutiert, sowohl für Tiere als auch für Menschen (Wernicke, 1874; Brodmann, 1909; von Economo und Horn, 1930; Penfield und Jasper, 1954; Woolsey, 1971; Celesia, 1976; Galaburda und Sanides, 1980; Romani, 1982; Morel, 1993).

Einige Untersuchungen zur Tonotopie der primären Hörrinde stammen aus den 1940`ger Jahren und wurden an Affen durchgeführt (Licklider, 1942; Walzl, 1943). Andere konnten diese Tonotopie auch bei Katzen zeigen (Reale und Imig, 1980). Meist handelt es sich um experimentelle Reizungen mit Elektroden an Hirnschnitten. Zur Tonotopie der Temporalregion und des Hörkortex gibt es auch funktionelle Untersuchungen mit PET und funktioneller Magnet Resonanz Tomographie (f-MRT), die die Auffassung einer tonotopen Ordnung nach Frequenzen stark untermauern (Lauter, 1983; Lauter, 1985; Wessinger, 1997).

Durch elektrische Stimulation wurden nicht nur die tonotopen Anordnungen in den Ganglien entdeckt, sondern auch spezifisch auf unterschiedliche Stimuli ansprechende Neuronenpopulationen (de Charms, 1998). Dabei handelte es sich um primär auditive Nervenzellen in Primaten, die eine Selektivität für Frequenz und Intensität sowie Beginn und Ende akustischer Signale hatten.

Diese Studie legt nahe, daß der auditorische Kortex akustische Ereignisse in verschiedene Qualitäten zu zerlegen scheint oder auch spezifisch auf Stimmen anspricht (Belin, 2000).

Hinweise auf eine hierarchische Reizverarbeitung gibt es auch aus den funktionellen Untersuchungen mit f-MRT bei Menschen (Wessinger, 2001). Über den Stand der Forschung zur speziellen Rolle des Planum temporale informiert ein Übersichtsartikel von Shapleske et al. (1999).

4.3 Amusien – die Unfähigkeit Musik wahrzunehmen

Es gibt Menschen, die nicht in der Lage sind, Musik oder Teilaspekte von Musik (z.B. Rhythmus) wahrzunehmen, auch wenn sie das einmal konnten. Häufig handelt es sich um Personen, die durch die gezielte Entfernung eines Teils der Temporallappen von einer Epilepsie zu heilen versucht wurden, oder Personen die durch einen ausgedehnten Hirninfarkt Hirnsubstanz verloren. Ein berühmtes Beispiel ist der Komponist Maurice Ravel (1875-1937), der nach und nach kurz vor seinem Tod selektive musikalische Ausfälle erlitt. So konnte er z.B. keine Noten mehr lesen, komponieren oder vom Blatt Klavier spielen. Jedoch blieben sein musikalischer Sinn für Ästhetik und sein Hörvermögen unbeeinflusst. Weiter litt er unter einer Wernicke Aphasie (Sergent, 1993(2)).

Justine Sergent hat in dem Artikel Rückschlüsse auf wahrscheinlich betroffene Hirnregionen, unter Einbeziehung aktueller Ergebnisse einer PET Studie gezogen. Bei der Studie wurde die Hirnaktivität beim Notenlesen erfaßt und mit der Lage des Wernicke Areals verglichen. Es läßt sich nicht genau erklären, woran M. Ravel litt. Nach der Anamnese und Informationen die mündlich überliefert sind, erscheint eine, sich langsam ausdehnende, subdurale Blutung am wahrscheinlichsten (mündlich Prof. Bien, Marburg).

Wie dem auch sei. Es findet sich in der Literatur des öfteren Erstens:

eine Verbindung von musikalischen und verbalen Ausfällen wie bei Ravel (Sergent, 1993(1); Platel, 1998).

Zweitens, finden sich selektive Ausfälle von musikalischen Fähigkeiten, ohne je alle Fähigkeiten die Musik betreffend einzubüßen.

Es gibt unzählige Studien und Fallbeschreibungen von musikalischen Agnosien auch durch Schlaganfälle oder nach Enzephalitis, wobei die Amusien oft nur bei gezielter Untersuchung auffallen (Münste, 1998; Taniwaki, 2000M; Piccirilli, 2000; Kaga, 2000; Clarke, 2000).

Nach einem linkshemisphärischen Infarkt eines Musikers berichtet Mavlov (Mavlov, 1980) über dessen Unfähigkeit, einfache Rhythmen zu erkennen oder nachzuahmen. Die Erkennung und Ausführung leichter Melodien jedoch war erhalten. Da es keine Rolle spielte, wie die Rhythmen präsentiert wurden (akustisch, optisch oder über Berührung) folgte er, daß Rhythmusempfinden eine übergeordnete neuronale Leistung ist, die mit der Erfassung von Zeitintervallen generell zu tun haben muß. Mavlov untersuchte diesen Patienten mehrfach nach, aber die „rhythmische Agnosie“ persistierte.

Ein anderer Fall beschreibt den Verlust der Klangfarben-(Timbre)Wahrnehmung bei einem 58-jährigen Mann nach einer transitorischen ischämischen Attacke (TIA) mit nachgewiesenen Substanzverringernngen des rechten Temporallappens im CCT (Mazzucchi, 1982).

Obwohl sonst keine Ausfälle in Bezug auf Rhythmus und Melodieerkennung vorlagen, beklagte der Mann ein vor allem ästhetisch eingeschränktes Hörerlebnis. Er konnte die Musik nicht genießen, da er die bekannten Klangfarben vermißte. Unterscheidung von verschiedenen Instrumenten oder Geräuschen, die nicht durch einen typischen Rhythmus zu erkennen waren, fielen schwer. Ähnliche Ergebnisse in Bezug auf Timbrewahrnehmung im rechten Temporallappen finden sich auch bei Samson und Zatorre (1994).

Ein sehr interessanter Fall eines Patienten mit beidseitigem Infarkt der Arteria cerebri media wurde von Mendez und Geehan (1988) beschrieben und von Tramo et al. neuropsychologisch und anatomisch in Bezug auf musikalische Agnosien untersucht (Mendez und Geehan,

1988; Tramo, Bharucha und Musiek, 1990). Der 30-jährige Mann hatte durch kardiale Emboli nacheinander, beiderseits die kompletten Heschel'schen Querwindungen eingebüßt. Fast der gesamte rechte Temporallappen (98%) incl. des Amygdalas, des Uncus und fast 70% des Hippokampus sowie der größte Teil des Planum temporale waren zerstört. Auf der linken Seite waren die Substanzdefekte weniger ausgeprägt (20%).

Die Untersuchung erfolgte mit hochauflösender MRT, zu der ergänzend Bestimmungen der Hörleistung mittels Audiometrie und musikalischen Tests durchgeführt wurden. Der Patient sollte verschiedene Akkorde in ihrer mehr oder weniger vorhandenen, harmonischen Zusammengehörigkeit beurteilen. Dabei zeigte sich ein Normalbefund in der Tonaudiometrie. Die Beurteilung von Dissonanz und Konsonanz war empfindlich beeinträchtigt die Zuordnung von Akkorden in einen harmonischen Kontext dagegen nicht. Auch hier findet sich also wieder ein sog. dissoziierter Befund. Harmonische Beziehungen von Tönen in einem größeren Zusammenhang scheinen unabhängig von der Konsonanzwahrnehmung zu funktionieren und außerdem unabhängig von einem intakten primären auditiven Kortex zu sein.

4.4 Trennung von Melodie- und Rhythmuswahrnehmung?

Immer wieder wird bei den Studien und Fallbeschreibungen davon ausgegangen, daß man es bei Musik- und Zeiteinschätzungen (Rhythmus) mit weitläufigen neuronalen Netzwerken zu tun hat (Zatorre, 1988; Zatorre, 1994; Rao, 2001). In der f-MRT Studie von Rao wird postuliert, daß die Basalganglien, die Kleinhirnhemisphären und der rechte prämotorische Kortex eine essentielle Rolle bei den neuronalen Netzwerken für Zeitempfinden spielen. In einer 1998 durchgeführten PET Untersuchung findet sich ein gleichlautendes Ergebnis (Penhune, 1998).

Die schon oben genannten Dissoziationen von bestimmten „Parametern“ der Musik wie Melodie und Rhythmus waren immer wieder Gegenstand von Untersuchungen. Isabelle Peretz demonstrierte bei ebenfalls hirngeschädigten Patienten eine Zuordnung verschiedener musikalischer Aufgaben zu den beiden Hemisphären des Hirns (Peretz, 1990). Links- und Rechtshemisphärisch geschädigte Patienten wurden neuropsychologisch und spezifisch auf Beurteilung melodischer und rhythmischer Zusammenhänge getestet. Dabei sollte das Metrum ($2/4$ oder $3/4$) und Kontur sowie Tonfolge und Rhythmus an verschiedenen Beispielen beurteilt werden. Die Ausfälle im Urteilsvermögen der 20 erkrankten Patienten im Vergleich zu den 20 gesunden Versuchspersonen (VPn) führten zu folgender groben Zuordnung zu den Hemisphären:

LINKS:	Rhythmische Elemente und Tonreihenfolge
RECHTS:	Metrum und Kontur der Melodie.

Es wird darauf hingewiesen, daß es durchaus auch berechtigte Zweifel an einer starren Zuordnung gibt, was auch andere Autoren bestätigen (Schuppert, 1997). Gerade im Bezug auf die Läsionsstudien und Hemisphären Dominanz ist oft ein Hang zur Überinterpretation bemängelt worden (Sergent, 1993 (1)).

Dennoch scheint es eine Tendenz zur LOKAL und GLOBAL bezogenen Verarbeitung im Hirn zu geben was bedeuten soll, daß die Hemisphären links eher Tonabstände, einzelne Intervalle und rhythmische Einzelereignisse analysieren, also lokale Analyse betreiben. Rechts dagegen eher größere Zusammenhänge wie die Kontur einer Melodie, das Metrum und der Gesamtaufbau des musikalischen Ereignisses global erfaßt werden. Auch andere Studien bestätigen das, aber es gibt immer wieder Hinweise, daß diese Einteilung variabel sein kann und viele verschiedene und individuell unterschiedliche Netzwerke bestehen. Dabei spielt vor allem auch die musikalische Ausbildung eine große Rolle (Schuppert, 2000).

Aus allen diesen Studien geht die Schlußfolgerung hervor, daß es unterschiedliche Repräsentationen von musikalischen Fähigkeiten im Gehirn des Menschen geben muß. Vor allem fällt die zu vermutende Trennung von Rhythmus und Melodiewahrnehmung auf.

Für die vorliegende Studie war die Frage bedeutend, ob sich die beschriebene Dissoziation zwischen Melodie- und Rhythmusverarbeitung (Peretz und Kolinsky, 1993; Peretz, 1994) auch strukturell in der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie darstellen ließe. Mit anderen Worten: Gibt es nachweislich funktionell gegeneinander abgrenzbare neuronale Strukturen, die für Melodie- bzw. Rhythmuswahrnehmung zuständig sind?

Für unsere Untersuchung wurde ein sog. „passives Paradigma“ gewählt, bei dem immer eine der beiden Komponenten Melodie, Rhythmus oder beide verändert wurden. „Passiv“, weil die VPn keine Beurteilung abgeben oder Vergleiche ziehen sollten. Die jeweilige Gegenkomponente wurde weitestgehend konstant gehalten. Die Melodie ist jedoch nie völlig unabhängig vom Rhythmus, denn schließlich macht erst das Zusammenwirken aller Bestandteile wirkliche Musik aus. Die auch bei der Reizverarbeitung nicht komplette Trennung konnte in Studien belegt werden. So ist nicht nur der Rhythmus sondern auch Tonhöhe, Kontur und Metrum ein wichtiger Bestandteil bei der Melodie(wieder)erkennung (Massaro, 1980; Kidd, 1984; Dawe, 1993). Dennoch sollte versucht werden, die unterschiedliche Auftrennung der musikalischen Qualitäten, die auch durch die Ergebnisse der oben genannten Untersuchungen nahegelegt wird, nachzuvollziehen.

5. Material und Methoden

5.1 Die Versuchspersonen

Tabelle1:

VP	IDNr	Alter	Geschl	R/L	Beginn Ausblg	Jahre Ausblg	Instr	Jahre Instr
W.P.	7766	26	m	R	<6	15	Kv	20
S-F.J.	7767	35	m	R	>6	12	Per	23
R.D.	7768	24	m	R	>6	15	Vl	16
W.R.	7864	37	m	R	>6	10	Kv Og	18
B.R.	7865	25	w	R	>6	16	Kl	10
S.H.	7866	27	m	R	<6	3	Vl	20
P.A.	7874	30	w	r/l	<6	24	Vl	24
S.M.	7875	22	w	R	<6	17	Ob	13
F.A.	7877	31	m	R	<6	6	Tr	18
W.M.	8127	23	m	R	>6	12	Kl	12

Legende Tab.1:(VP = Versuchsperson; IDNr = Identifikationsnummer während des Versuchs; R/L = Händigkeit; Kv = Klavier; Vl = Violine; Og = Orgel; Kl = Klarinette; Ob = Oboe; Tr = Trompete; Per = Perkussion (Pauke/Schlagwerk).

In dieser Studie wurden 10 gesunde Erwachsene untersucht, darunter 7 Männer und 3 Frauen im Alter von 23 bis 35 Jahren (Tabelle 1). 50% der VPn begannen mit der musikalischen Ausbildung vor dem 6ten Lebensjahr (Beginn Ausblg.). Die Dauer der Ausbildung lag zwischen 6 und 24 Jahren (musikalische Grundausbildung und Instrumentalunterricht) und damit im Mittel bei 13.5 Jahren (Jahre Ausblg.).

Die Instrumentalerfahrung schwankte dabei in der Gesamtzahl an Jahren zwischen 10 und 24 Jahren an einem Instrument, im Durchschnitt waren es 17.4 Jahre (Jahre Instr.).

Alle Probanden nahmen freiwillig und nach Aufklärung über eventuelle Risiken der Kernspintomographie an der Studie teil. Jeder und jede einzelne VP füllte vor der Untersuchung eine Metallanamnese aus, die eventuelle Kontraindikationen prüfte und auch bei Patienten benutzt wird. Bei keinem/r der VPn fand sich eine Kontraindikation für die Durchführung der MRT. Alle Personen erhielten eine finanzielle Aufwandsentschädigung von 15 DM pro Stunde.

Nach Unterzeichnung der Einwilligung in den Versuch, die auch die Zustimmung beinhaltet, über eventuelle Pathologika in der Bildgebung informiert werden zu wollen, wurde allen VPn der Ablauf der Untersuchung genau erklärt und ggf. Fragen beantwortet.

5.2 Warum Musiker?

9 der 10 Teilnehmer der Studie waren zum Zeitpunkt der Untersuchung Mitglied eines Studentensinfonieorchesters, eine VP war ehrenamtlich als Kirchenmusiker und Chorleiter tätig. Es wird betont, daß alle Teilnehmer dieser Studie weder Berufsmusiker noch Musikstudenten sind. Dennoch erschien es uns sinnvoll, Musiker und Musikerinnen zu untersuchen, die ein Mindestmaß an musikalischer Ausbildung genossen hatten.

Verschiedene Studien haben gezeigt, daß MusikerInnen die ein „absolutes Gehör“ haben, oder vor dem 7ten Lebensjahr mit Ihrer Musikerziehung begannen, in volumetrischen Messungen der Hirnoberfläche signifikant größere Repräsentationen im Bereich des linken Planum temporale bzw. einen größeren Balkendurchmesser mit mehr Faserverbindungen der Großhirnhemisphären aufwiesen (Schlaug, 1995(1),(2); Pantev, 1998).

Im Umgang mit komplizierteren Rhythmen zeigten sich außerdem Unterschiede zwischen Laien (ohne musikalische Ausbildung) und routinierten Musikern, wobei es Letzteren leichter fiel, komplexe Rhythmen zu imitieren (Povel, 1981). Diese Erkenntnisse zeigen, daß es notwendig ist die Frage: „Warum Musiker?“ zu stellen.

Es ergeben sich immer wieder Hinweise auf eine enorme Plastizität des Gehirns. Diese bleibt offenbar auch nach Abschluß der eigentlichen Hirnreifung erhalten und hilft uns z.B. auch als Erwachsene das Klavierspielen zu erlernen. Es wurde nämlich beobachtet, daß Profimusiker im Vergleich zu Schülern des gleichen Instrumentes ihre kortikalen Vernetzungen effektiver zu nutzen scheinen (Altenmüller, 1998), sowie weniger Asymmetrien bei bimanuellen Tätigkeiten aufweisen (Jancke, 1997).

Interessanterweise fand sich die geringere Asymmetrie in der Händigkeit nicht in Abhängigkeit vom Instrument sondern viel mehr in Abhängigkeit vom Alter der Person zu Beginn des ersten Unterrichts. Daher bekommt die Frage wie lange schon ein Instrument gespielt oder musikalische Ausbildung genossen wurde, vielmehr Gewicht.

In einer Arbeit von Justine Sergent (Sergent, 1993(1)) wird der Sinn dieser speziellen Probandenwahl aus Musikkreisen damit begründet, daß diese durch die gezielte Ausbildung besser geschult, sowie routinierter im Umgang mit Melodie- und Rhythmusmaterial sind. Dabei wird argumentiert, daß man logischerweise auch Sprachuntersuchungen zunächst mit Personen durchführen würde, die in der jeweiligen Sprache heimisch sind, im Sinne eines „native speaker“.

5.3 Die Geräte und Einstellungen

5.3.1 Der Kernspintomograph

Als Meßgerät diente ein Kernspintomograph der Firma GE (Signa Horizon) mit 1.5 Tesla Feldstärke, wie er auch zur klinischen Routine verwendet wird. Wir verwendeten für die funktionelle Messung eine T2 gewichtete EPI BOLD Sequenz (TR: 5000 ms, TE: 60 ms, FA 90°, Matrix 64 x 64, FOV: 240 mm x 240 mm). Ein Volumen bestand aus 22 axialen Schichten mit einer Dicke von je 5 mm. 126 Volumen wurden in 10:30 min aufgezeichnet.

Für die anatomischen T1 Aufnahmen wurde eine fast-spin gradient echo (FSPGR) Sequenz benutzt (TR: 11.1 ms, TE: 4.2 ms, Nex: 3, Matrix: 256 * 192, FOV: 240 * 180 mm, für eine Auflösung von 0.9375 x 0.9375 mm). 124 axiale Schichten mit einer Dicke von 1.4 mm wurden in 10:15 min angefertigt.

BOLD steht für „blood oxygenation level dependent“ contrast und ist eine Bildgebung, die sich die paramagnetische Eigenschaft von Desoxyhämoglobin zu Nutzen macht. Das nicht oxygenierte Hämoglobin gibt im Magnetfeld ein Signal ab, welches dem des Gadolinium ähnlich ist. Dieses läßt sich messen und zur funktionellen Darstellung benutzen.

Wird ein Hirnareal auf Grund der neurovaskulären Kopplung bei Aktivierung der Nervenzellen vermehrt durchblutet, strömt vermehrt sauerstoffreiches Blut ein. Dadurch wird der Anteil des Desoxyhämoglobins relativ verringert, i.e.: verdünnt. Diesen Abfall der Konzentration kann man als Korrelation von Hirnaktivität im f-MRT darstellen (Ogawa, 1990; Moonen, 1990; Moonen, 1995).

5.3.2 Das Computerprogramm zur Reizdarbietung

Das Computerprogramm zur Erzeugung der musikalischen Reize CUBASIS AV (Steinberg Soft- und Hardware GmbH, Eifflerstrasse 596, D-20537 Hamburg, Deutschland) ermöglichte es im Klaviersound Melodien in beliebigen Variationen anzubieten und während des laufenden Versuchs zu ändern oder neue Variationen aufzurufen.

5.3.2 Die musikalischen Reize

Als Ausgangsmelodie wurde ein Thema aus einer Sinfonie gewählt, das eine ausreichende Länge hat und einfache rhythmische Elemente besitzt. Aus dieser Melodie (M1) wurden vier Melodien entwickelt, die sich immer in nur 1 bis 2 Tönen, oder einer rhythmischen Variante unterscheiden (M2-4).

Aus diesen 4, fast identischen Grundmelodien wurde nun jeweils durch Randomisierung eine Abwandlung der Tonreihenfolge bei gleichem Rhythmus, eine neue rhythmische Struktur bei gleicher Tonreihenfolge sowie eine komplette Randomisierung beider Bestandteile vorgenommen. Bei der Neuverteilung der Töne bzw. der Tonlängen und Pausen, wurde per Los die Reihenfolge neu festgelegt. Jeder Ton bekam eine Nummer. Die nacheinander gezogenen Töne erhielten einen neuen Platz. Anschließend wurde für die nächste Bedingung jedem Notenwert und jeder Pause eine fortlaufende Nummer gegeben. Bei der Ziehung der Nummern folgte also eine Zuordnung der Länge zu den schon vorhandenen Tönen. Wenn eine Pause gezogen wurde, wurde diese ihrem Wert entsprechend eingesetzt. Dabei wurde nicht auf Sinnhaftigkeit der Neukombination geachtet. Es ging primär um die isolierte Manipulation an einer der beiden Komponenten bei konstanten Gegenkomponenten.

Wenn man sich die Notenbeispiele ansieht (s. Anhang, S. 83 ff.) kann man erkennen, daß die Tonreihenfolge bei neu kombinierten Tonlängen gleich ist, s. d. die Ursprungsmelodie erkennbar bleibt. Gleiches gilt umgekehrt für den Rhythmus. Das Metrum, also der 4/4 Takt blieb unberührt.

Die auf Notenpapier geschaffenen Stücke wurde dann in CUBASIS AV Ton für Ton und Pause für Pause übertragen. Im Programm lassen sich kleine Blöcke einzelner Stücke schaffen, die man dann in beliebiger Reihenfolge hintereinander abspielen kann. Diese lassen sich sehr einfach auf der Oberfläche verschieben. Beim Abspielen zeigt das Programm ständig die aktuelle Position der laufenden Reizdarbietung. Es war möglich verschiedene Voreinstellungen festzulegen, die dann auch während des Versuchs kombiniert oder neu aufgerufen werden konnten. Im Rahmen der Vorversuche erwies sich das Programm als sehr flexibel, da auch Geräusche als Datei in den Ablauf aufgenommen werden konnten (z.B. die baseline = Weißes Rauschen s.u.).

Die Einteilung in die zwei Hauptbestandteile Melodie und Rhythmus ist konform mit vielen anderen Studien, bleibt aber wie noch unten erwähnt wird, meist hinter dem eigentlichen Musikerlebnis zurück. Siehe hierzu auch den Übersichtsartikel von Carol L. Krumhansl: Rhythm and Pitch in Music Cognition (2000) zum Stand der aktuellen psychologischen Studien.

Zur Verdeutlichung der Reizdarbietung hier die Variationen der Grundmelodie:

- 1) **Melodie 1 (M 1 oder auch M 2-4)**
- 2) **Tonreihenfolge neu; Rhythmus Elemente wie in M 1**
- 3) **Tonreihenfolge wie in M 1; Rhythmus Elemente neu**
- 4) **beide Elemente neu angeordnet (Random)**

Alle Melodien (M 1-4) und ihre Variationen wurden genau auf 30 Sekunden Länge eingestellt. Wie schon erwähnt dienten als Ausgangsmaterial immer die in M 1-4 vorkommenden Töne, z.B. 4 mal der Ton Fis etc., bzw. 6 mal eine Achtelnote oder 3 mal eine Viertelpause.

Dadurch wurde erreicht, daß über die Zeit von 30 Sekunden physikalisch immer die gleichen Töne, Tonlängen und Pausen wie in M 1-4 vorkamen, nur in unterschiedlichen Kombinationen.

Die Aufteilung der verschiedenen Bedingungen noch einmal zur Übersicht:

M1.1	M1.2	M1.3	M1.4
M2.1	M2.2	M2.3	M2.4
M3.1	M3.2	M3.3	M3.4
M4.1	M4.2	M4.3	M4.4

Als Kontrollbedingung bzw. 0-Bedingung wurde den musikalischen Reizen ein sog. Weißes Rauschen (WN=White Noise) gegenübergestellt. Dieses Rauschen enthält ein Frequenzspektrum von ca. 40 bis 20.000 Hz, so wie es z.B. bei der Vertäubung eines Ohres in der Hörtestung (Audiologie) benutzt wird.

Die Reihenfolge der Darbietung wurde so gewählt, daß immer 4 Bedingungen von WN unterbrochen wurden und sie sich innerhalb dieser Blöcke abwechselten z.B.:

WN 1, 2, 3, 4 WN 2, 3, 4, 1 WN 3, 4, 1, 2

WN 4, 1, 2, 3 WN Ende.

Am Schluß wurde mit WN geendet. Jeder Durchgang dauerte genau 10 min 30 sec. und wurde 3 mal wiederholt, unterbrochen von der anatomischen Sequenz.

Um die Aufmerksamkeit der VP auf die Reize zu lenken, wurden die Probanden gebeten, zuzuhören und einzelne Akzente (einzelne Töne waren plötzlich lauter als andere, so als würde der künstliche Pianist eine Taste des Pianos härter anschlagen) zu zählen. Bei jedem Durchgang wurden diese Akzente verschoben, so daß es immer zwischen 0 und 3 Akzente waren, die in jeder Pause abgefragt wurden.

5.4 Ablauf der Untersuchung

Die Probanden wurden mit einer Schlafmaske (um optische Reize auszuschalten) und Kopfhörern versehen in den Tomographen geschoben. Die Schallübertragung erfolgte über Luftleitung. Eine komplette Abdichtung gegenüber den MRT Impulsen war nicht möglich, so daß die Lautstärke subjektiv dem Impulston überlegen gewählt wurde. Der MRT Pulston wurde als Konstante während des gesamten Versuchs betrachtet, und war somit vernachlässigbar.

Nach den ersten Prescans zur Lokalisation wurden jeweils zwei funktionelle Sequenzen, dann eine anatomische und zum Schluß eine dritte funktionelle aufgenommen, um die Probanden nicht zu ermüden.

Nach jeder Sequenz wurde die Qualität der Bilder überprüft um ggf. zu wiederholen. Nur eine funktionelle Sequenz mußte während des Gesamtversuchs wiederholt werden, da sich einer der Kopfhörer vom Übertragungsschlauch gelöst hatte.

5.5 Die Auswertung der Daten

Bei der Auswertung wurden alle 5 Bedingungen (1-4 und WN) intra-individuell über die 3 funktionellen Sequenzen sowie interindividuell über alle 10 VPn gemittelt berechnet. In jeder Sequenz wiederholten sich die Bedingungen 4 mal, WN 5 mal. Bei drei wiederholten Sequenzen also 12 mal jeder Reiz pro VP. WN dementsprechend 15 mal. Siehe auch 5.5.1 für Einzelheiten. Hier zunächst ein einfach gehaltener Überblick.

1)

Die 4 Musik-Bedingungen wurden als sog. Prädiktoren (P 1-4) in die Auswertung einbezogen. WN fungierte als Basisbedingung. Bei allen VPn wurde in einem Allgemeinen Linearen Modell („general linear model“ = in der Folge als GLM abgekürzt) eine Einzelanalyse der Voxelanzahl in den aktivierten Bereichen vorgenommen. Dabei wurde zunächst bestimmt, in welchen Hirnarealen Aktivität zu finden ist. Die aktivierten Areale wurden einzeln in der Anzahl der Voxel (Volumeneinheiten des MRT) sowie der genauen Koordinaten des Clusterschwerpunktes im Talairach-System (Talairach und Tournoux, 1988) erfaßt (Tabelle 2, S.36 ff.).

2)

Im nächsten Schritt wurden dann in einer Gruppenauswertung alle VPn rechnerisch übereinander gelegt und eine Mittelung durchgeführt (s. S. 40 ff.). Auch hier wurden wieder Anzahl der Voxel und Schwerpunktkoordinaten erfaßt. Diese GLM Bilder werden auch als GLM-Maps bezeichnet.

3)

Schließlich folgte noch eine Berechnung verschiedener Kontraste innerhalb des GLM. Dabei wurden einzelne Prädiktoren voneinander subtrahiert, um z.B. zu sehen, welche Hirnareale im Vergleich zur Ausgangsmelodie bei der komplett randomisierten Melodie/Rhythmusversion (M4) aktiver sind (s. S. 31 f.)

5.5.1 Das Programm Brain-Voyager 3.9

(BrainInnovation; www.brainvoyager.de), erlaubt es, funktionelle 2D-Bilddaten zu bearbeiten und mit anatomischen Bildern zu koregistrieren. Dazu wurde eine Microsoft NT Alpha Work Station benutzt. Die beiden ersten Volumen der funktionellen Daten wurden jeweils regelrecht auf Grund von Signalinhomogenitäten verworfen, s.d. 124 übrigblieben. Es folgten u.a. Filterungen auf Voxelniveau für niederfrequente Signalschwankungen (0.067 Hz als cutoff).

Die anatomischen T1-Aufnahmen wurden zu Bilddaten im ISO Voxelformat vom 1mm x 1mm x 1mm verrechnet, unter Anwendung einer Sinc Interpolation. Es folgte schließlich die Einfügung in das Talairach/Tournoux Koordinatensystem.

Anschließend wurden alle funktionellen 2D-Datensätze einer VP mit den passenden 3D-Anatomiebildern geschichtet (2D-3D alignment) und ebenfalls ins Talairach-System übertragen. Hierbei erfolgte eine 3D-Bewegungsartefaktkorrektur. Das GLM wurde für alle VPn und die 4 Prädiktoren als Einzelanalyse berechnet, welches eine Identifizierung der aktiven Areale ermöglichte. White Noise (WN) diente dabei als Basisbedingung.

Durch die vasomotorische Verzögerung war es nötig den Erfassungszeitraum 5 Sekunden nach hinten zu versetzen, um nach dem Reiz das Maximum der Hirnaktivität voll zu erfassen.

Die minimale Clustergröße der aktiven Voxel wurde auf 100 festgesetzt, s.d. nur Voxel analysiert wurden, die andere aktive Voxel in direkter Umgebung hatten. Die aktiven Areale sind in Kapitel 6.1, S. 34 gesondert aufgeführt. Nur Voxel mit einem Korrelationskoeffizienten von $R > 0.5$ wurden zunächst als aktive Voxel definiert.

Durch die großen Voxelmengen ($N = 256 \times 256 \times 256 = 16777216$) wurde es nötig, den gewonnenen p-Wert durch die Anzahl der Voxel zu teilen, um ihn abzusichern. Daher folgte die Bonferroni Korrektur

$$(\alpha' = \alpha / N; N = 16777216).$$

Für jede VP und jeden Prädiktor wurde dann die prozentuale Signaländerung 4 Volumen je vor und nach sowie 6 Volumen während der Reizdarbietung (also während eines einzelnen Prädiktors) bestimmt. Die funktionellen 3D-Zeitaktivitätsdaten wurden schließlich mit einer Gauß'schen Funktion von 6 Talairach-mm Kernel (full width at half maximum, FWHM) geglättet. Diese 3D-Daten dienten als Grundlage der GLM Gesamtanalyse (multi-study-multi-subjects).

Um Varianzunterschiede im Zeitverlauf zwischen VPn auszugleichen, wurde für jede Einzelperson eine z-Standardisierung durchgeführt. Diese Daten der oben unter 2) erläuterten Berechnung aller Prädiktoren wurde auf eine einzige der anatomischen Sequenzen übertragen (s. Kap.6.2, S. 40).

Die Berechnung verschiedener Kontraste bildete den Abschluß der Untersuchung. Hier wurden Subtraktionen immer auf der Basis der GLM-maps durchgeführt.

Dabei wurden folgende Kontraste berechnet:

- 1) **Melodie 1 (M 1 oder auch M 2-4)**
- 2) **Tonreihenfolge neu; Rhythmus Elemente wie in M 1**
- 3) **Tonreihenfolge wie in M 1; Rhythmus Elemente neu**
- 4) **beide Elemente neu angeordnet (Random)**

	On	Off		On	Off
A	2 versus 1		E	1 versus 2	
B	3 versus 1		F	1 versus 3	
C	4 versus 1		G	2 versus 4	
D	1 versus 4		H	3 versus 4	

„On“ steht für die Bedingung von der man die aktiven Voxel im Vergleich zur „Off“ Bedingung darstellen will. Anders gesagt wird die Hirnaktivität dargestellt, die bei der „On“ Bedingung neu oder anders ist als bei „Off“. Ziel war es durch die Subtraktion z.B. bei Kontrast H Bereiche zu isolieren die durch die ursprüngliche Melodie aktiviert werden. Bei Kontrast C z.B. war die Frage ob Hirnregionen durch eine für den Hörenden völlig sinnlose Musik trotzdem gezielt angesprochen werden – vor allem im Vergleich mit der Ursprungsmelodie.

Bei den folgenden Darstellungen der Hirnschnitte wurde eine anatomische Sequenz ausgesucht und die jeweiligen funktionellen Ergebnisse darüber dargelegt. Die Schnittführungen sind horizontal in 8 und auch 10 Schichten und jeweils 5 mm dick von apikal nach kaudal vorgenommen worden, s.d. sie immer in der selben Höhe dargestellt sind. Anhand der Talairach-Koordinaten erfolgte die anatomische Zuordnung im Atlas.

Die Koordinaten sind in den folgenden Tabellen mit den Schwerpunkten des Voxelclusters in mm angegeben und erscheinen jeweils auch für eine Region (ROI) in der Graphik.

Bei der Einzelanalyse ergaben sich bei $R > 0.5$ als Freiheitsgrade

$F(4, 367) = 30.58, p > 0.0001$ (korrigiert).

Bei der Gesamtanalyse im GLM:

$F(4, 3715) = 309.58, p > 0.0001$ (korrigiert).

Für die Kontraste galten folgende Werte:

A	$F(2, 3717) = 37.55, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.1$
B	$F(2, 3717) = 59.0, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.125$
C	$F(2, 3717) = 59.0, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.125$
D	$F(2, 3717) = 247.8, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.25$
E	$F(2, 3717) = 367.6, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.3$
F	$F(2, 3717) = 518.9, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.35$
G	$F(2, 3717) = 85.56, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.15$
H	$F(2, 3717) = 85.56, p > 0.0001$ (korrigiert), $R > 0.15$

Die gefundenen Areale wurden dann bewertet und mit Ergebnissen anderer Studien verglichen. Es folgte eine kritische Diskussion über die Arbeit, das Paradigma, das Vorgehen und die Einordnung der Ergebnisse.

6. Ergebnisse

6.1 Allgemeines lineares Modell: einzelne Versuchspersonen

Die VPn erkannten im Laufe der Studie 92% der Akzente richtig. Bei der Einzelanalyse der Voxelanzahl bei jeder VP im general linear model (GLM – single study) zeigten sich letztlich 7 Hirnareale (ROI = region of interest), die weitestgehend bei allen VPn aktiviert waren, siehe Tabelle 2.

Es waren diese der Bereich des Gyrus temporalis superior und medius sowie der Bereich der Heschel'schen Querwindungen, Gyri temporales transversi (GTs, GTm, GTT). Diese Bezirke wurden bei der Analyse noch unterteilt in ROI 1-3.

Dabei wurde anatomisch getrennt: ROI 1 = obere Hälfte GTs, GTT. ROI 2 = untere Hälfte GTs und obere Hälfte des GTm sowie ROI 3 = untere Hälfte des GTm. Alle drei Bereiche waren bei den VPn fast immer gemeinsam in einem großen Cluster aktiv, s.d. man sie grundsätzlich zusammenhängend betrachten kann.

Weitere Bezirke waren Gyrus temporalis inferior und Gyrus fusiformis (ROI 4 GTi, GF). Lobus parietalis inferior und Gyrus supramarginalis (ROI 5 Lpi, Gsm), Gyri orbitales und Gyri occipitales medii et inferiores (ROI 6 Go, Gom, Goi) und schließlich die Gyri praecentrales (ROI 7 GPrC). Siehe auch die nächste Übersicht.

ROI	Areal	Brodmann Areal
1	G. temporalis superior (obere ½ GTs) G. temporales transversi (GTT)	41, 42, 22
2	G. temporalis superior (untere ½ GTs) G. temporalis medius (obere ½ GTm)	21, 22
3	G. temporalis medius (unter ½ GTm)	21
4	G. temporalis inferior (GTi) G. fusiformis (GF)	20, 37
5	Lobus parietalis inferior (LPi) G. supramarginalis (Gsm)	39, 40
6	G. orbitalis (Go) G. occipitalis inf. + medius (Goi + Gom)	18, 19
7	G. praecentralis (GPrC)	4, 6

Tabelle 2: Voxel-Analyse bei allen Prädiktoren, berechnet für die einzelnen Versuchspersonen 1-10, $R > 0.5$, Minimum der Clustergröße = 100 Voxel. Aufschlüsselung nach den regions of interest, ROI 1 – 7.

ROI 1	Obere ½ B Area GTs, 41, 42, 22 GTT							
VP	Voxel rechts	X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z
1	2940	51	-24	14	3115	-55	-25	13
2	3805	52	-13	6	1922	-50	-18	8
3	5871	50	-24	9	5477	-50	-28	9
4	3093	53	-27	4	3553	-57	-16	9
5	2318	57	-30	12	3131	-55	-33	10
6	1575	59	-16	10	3282	-56	-19	11
7	3208	51	-33	13	2337	-47	-33	16
8	4835	56	-28	7	4377	-56	-26	6
9	2910	55	-11	5	1204	-56	-15	4
10	2251	51	-23	0	1362	-53	-23	5

ROI 2	Untere ½ B Area GTs, 22, 21 obere ½ GTm							
VP	Voxel rechts	X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z
1	1833	53	5	0	1397	-49	1	0
2	1989	51	5	-2	1132	-49	1	1
3	2538	50	4	-1	1496	-49	0	-2
4	1873	52	3	-1	2202	-51	0	-1
5	210	47	-3	0	472	-53	-4	2
6	489	57	-6	0	527	-49	0	-5
7	2481	53	-5	4	6180	-53	-10	5
8	1752	55	-4	-2	1017	-47	1	-5
9	1254	56	7	1	1858	-56	5	-2
10	552	56	3	-6	1282	-55	-2	-7

ROI 3	Untere ½ B Area GTm 21							
VP	Voxel rechts	X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z
1	214	60	-32	-3	514	-58	-20	5
2	1611	55	-28	-1	275	-61	-27	-9
3	3329	59	-30	3	2513	-57	-32	4
4	745	62	-23	-1	933	-58	-5	0
5	448	59	-26	4	1263	-58	-18	5
6	611	-59	-12	4	0			
7	723	55	-51	7	0			
8	666	61	-34	-1	1024	-58	-29	-3
9	540	64	-32	6	1531	-60	-36	9
10	0				570	-51	-35	-10

ROI 4	GTi, GF B Area 20, 37							
VP	Voxel rechts	X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z
1	1123	40	-57	-5	1060	-59	-55	0
2	279	49	-66	5	550	-57	-49	7
3	629	41	-64	-13	597	-53	-65	8
4	0				375	-41	-70	2
5	0				0			
6	0				0			
7	0				0			
8	1100	60	-50	-15	0			
9	0				405	-61	-54	7
10	0				181	-62	-45	-12

ROI 5	Lpi, Gsm	B Area 39, 40							
VP	Voxel rechts	X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z	
1	448	20	-73	50	1432	-51	-43	28	
2	0				334	-32	-59	49	
3	1992	49	-34	53	1778	-57	-60	21	
4	0				0				
5	371	53	-39	50	0				
6	1218	43	-48	53	653	-53	-44	51	
7	0				713	-58	-49	35	
8	0				513	-42	-46	16	
9	624	48	-42	50	0				
10	300	38	-47	58	147	-45	-61	8	

ROI 6	Go, Gom+i	B Area 18, 19							
VP	Voxel rechts	X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z	
1	1014	46	-51	-9	665	-40	-81	-7	
2	117	28	-74	-14	245	-34	-77	-13	
3	103	6	-81	-9	194	-3	-82	-11	
4	1680	27	-82	-1	2001	-27	-88	1	
5	0				0				
6	145	36	-75	-8	116	-36	-83	-8	
7	389	39	-73	-5	0				
8	263	43	-67	-19	567	-8	-87	-10	
9	0				0				
10	0				731	-47	-69	-13	

ROI 7	GPrC	B Area							
VP	Voxel rechts	4, 6 X	Y	Z	Voxel links	X	Y	Z	
1	0				0				
2	681	39	-2	50	1282	-36	-4	52	
3	2726	45	-8	49	1779	-38	-14	49	
4	831	53	-3	47	720	-44	-9	42	
5	190	48	-10	52	273	-42	-15	42	
6	1284	47	-1	48	774	-45	-5	51	
7	0				0				
8	549	53	-13	46	838	-47	-15	44	
9	0				1225	-51	-1	39	
10	154	36	-10	58	444	-35	-13	58	

Bei den ROI 1-3 hatten alle VPn Aktivitäten, außer bei ROI 3 (unterer Gyrus temporalis medius), bei dem 3 VPn nur unilateral aktive Voxel zeigten. In der Region 4 (G. temp. inf., G. fusiformis) finden sich bei 3 VPn keine Voxel und bei 4 VPn nur unilateral. In der Region 5 (L. parietalis inf. und G. supramarginalis) zeigte nur eine VP keine aktiven Voxel und 5 VPn lediglich unilateral. Region 6 (G. orbitalis) war insgesamt bei 6 VPn beiderseits aktiv, bei 2 VPn einseitig und bei weiteren 2 VPn gar nicht. Der G. praecentralis (ROI 7) war bei 7 Probanden beiderseits aktiv, bei einer VP unilateral und bei 2 VPn nicht aktiv.

Wenn man die Voxelanzahl in den sieben Regionen jeweils über die VPn mittelt und Rechts mit Links in bezug auf die Summe der Mittelwerte vergleicht ergibt sich folgendes Ergebnis:

ROI	Voxel rechts		Voxel links	
1	3282	(1575-5871)	2996	(1204-5477)
2	1497	(210-2538)	1756	(472-6180)
3	889	(0-3329)	862	(0-2513)
4	313	(0-1123)	317	(0-1060)
5	495	(0-1992)	557	(0-1778)
6	371	(0-1014)	452	(0-2001)
7	642	(0-2726)	734	(0-1779)
<u>Σ</u>	7489		7674	<u>Δ: 185</u>

Die Differenz zwischen linker und rechter Hemisphäre beträgt 185 Voxel. Obwohl die Clustergrößen der Voxel als Maß für die Aktivität in den einzelnen ROI teilweise stark schwanken, bleibt bei der Summe der Mittelwerte links und rechts keine größere Differenz. Durchgängig aktiv sind die Bereiche der primären Hörrinde und des G. temp. sup. (ROI 1+2). Eine funktionelle Zuordnung ist hier allerdings nicht möglich, da bei der Einzel- und auch später der Gruppenauswertung alle Prädiktoren als aktives Kriterium gewählt wurden.

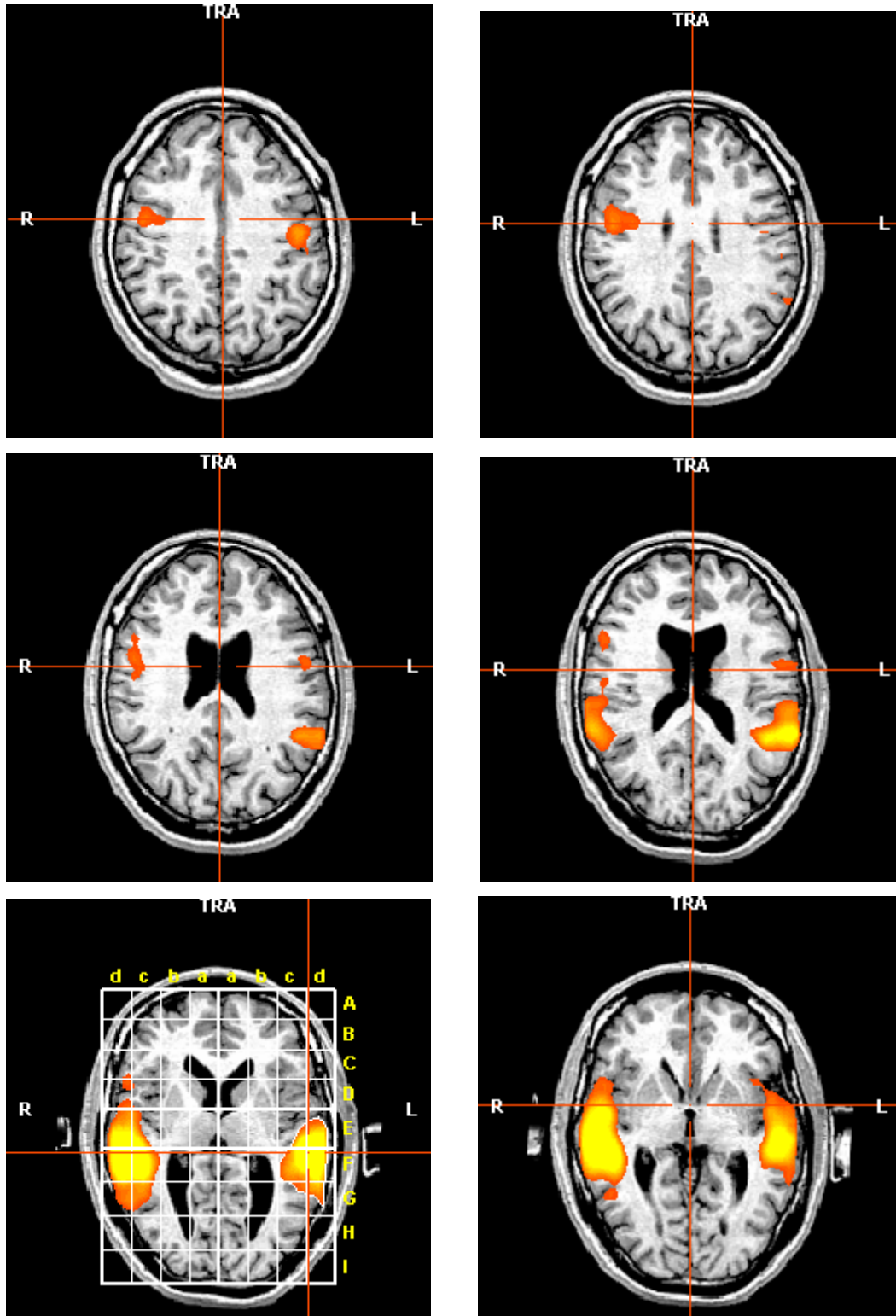
Im Durchschnitt am wenigsten aktive Voxel fanden sich in ROI 4 (G. temp. inf., G. fusiformis), gefolgt von den Gyri orbitales (ROI 6) mit allerdings 60% beidseitiger und bei 20 % einseitiger Aktivierung. ROI 5 (Lobus parietalis inf., G. supramarginalis) an dritter Stelle, und obwohl in relativer Nähe zum Planum temporale, fanden sich nur relativ inkonsistent Aktivierungen, die bei der Hälfte der VPn auch nur einseitig waren.

6.2 Allgemeines lineares Modell: Gruppenauswertung

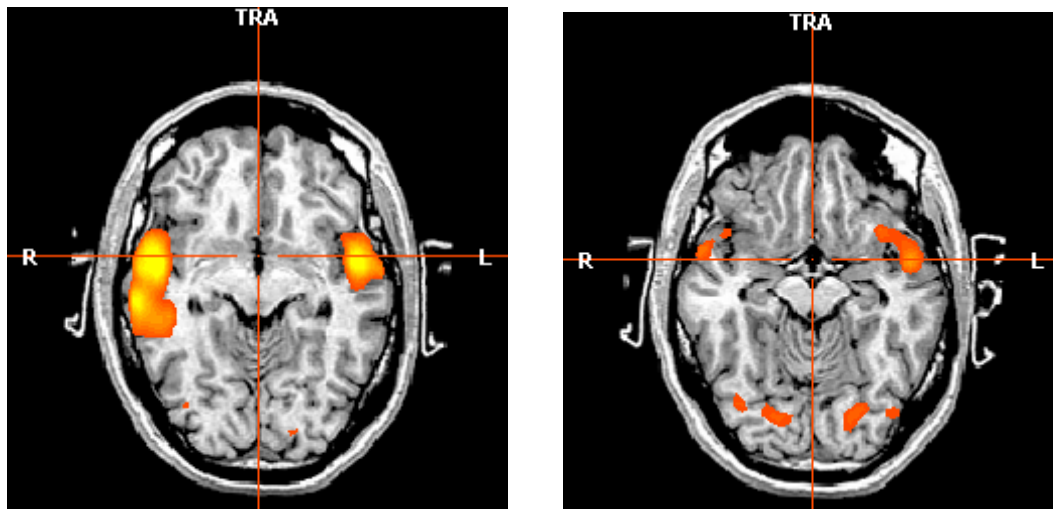
In der zweiten Analyse wurden nun die aktiven Voxel aus den funktionellen Daten über alle VPn berechnet. Es erfolgte erneut eine Darstellung aller Prädiktoren. In der ersten Graphik ist ein Gehirn mit den Aktivierungen dargestellt, wie sie sich bei einem Koeffizienten von $R > 0.5$ ergeben. In der Folge sind – wie schon erwähnt - immer die selben anatomischen Schnitte benutzt worden um die funktionellen Daten zu vergleichen.

Die Bilder orientieren sich an der radiologischen Konvention, s.d. die rechte Hemisphäre links erscheint und umgekehrt, siehe Graphik 1 und Tabelle 3. Die ROI entsprechen denen der Einzelanalyse 1-7 (s.o.).

Graphik 1: GLM Analyse, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.5$;
 Voxelzahl 26810, Position des Fadenkreuzes: x -49, y -22, z 9 links
 in den ROI 1-3 mit Koordinatengitter.



(Graphik 1 Fortsetzung)

**Tabelle 3, Voxel-Analyse der GLM-Analyse über alle 10 VPn und alle Prädiktoren.**

ROI	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
1	12577	52	-24	8	11000	-51	-29	11
2	5060	55	-27	5	10532	-51	-22	6
3	5534	55	-11	-2	5278	-50	-3	-2
4	0	0	0	0	1171	-3	-8	58
5	6898	43	-2	41	3984	-43	-10	45
6	536	18	-76	-10	968	-22	-75	-11
7	5957	41	-62	-2	1880	-51	-61	4

In der Zusammenfassung der aktivierten Areale bei allen 10 Personen waren erneut die Bereiche von G. Temp. transversi, superior und medius komplett aktiv. Der G. temp. inf und G. fusiformis jedoch nur links. Rechts stellten sich dort keine Voxel dar. Am wenigsten aktive Voxel fanden sich in der Okzipitalregion des Gyrus orbitalis und der Gyri occipitales inf. und medii. Die aktiven Areale sind in der Graphik deutlich zu erkennen (rot/gelb). Dargestellt sind jeweils nur Aktivitätszunahmen. Eine Analyse von Aktivitätsabnahmen erfolgte nicht.

6.3 Vergleich der Bedingungen

Als dritte Studie folgte wie schon oben angegeben eine Berechnung verschiedener Kontraste, bei denen die unterschiedlichen Aktivitäten der einzelnen Prädiktoren von einander subtrahiert wurden. Es bleiben die Voxel übrig, die bei dem jeweils erstgenannten Prädiktor im Vergleich zum zweitgenannten aktiver waren.

Die verschiedenen Prädiktoren noch einmal zur Erinnerung:

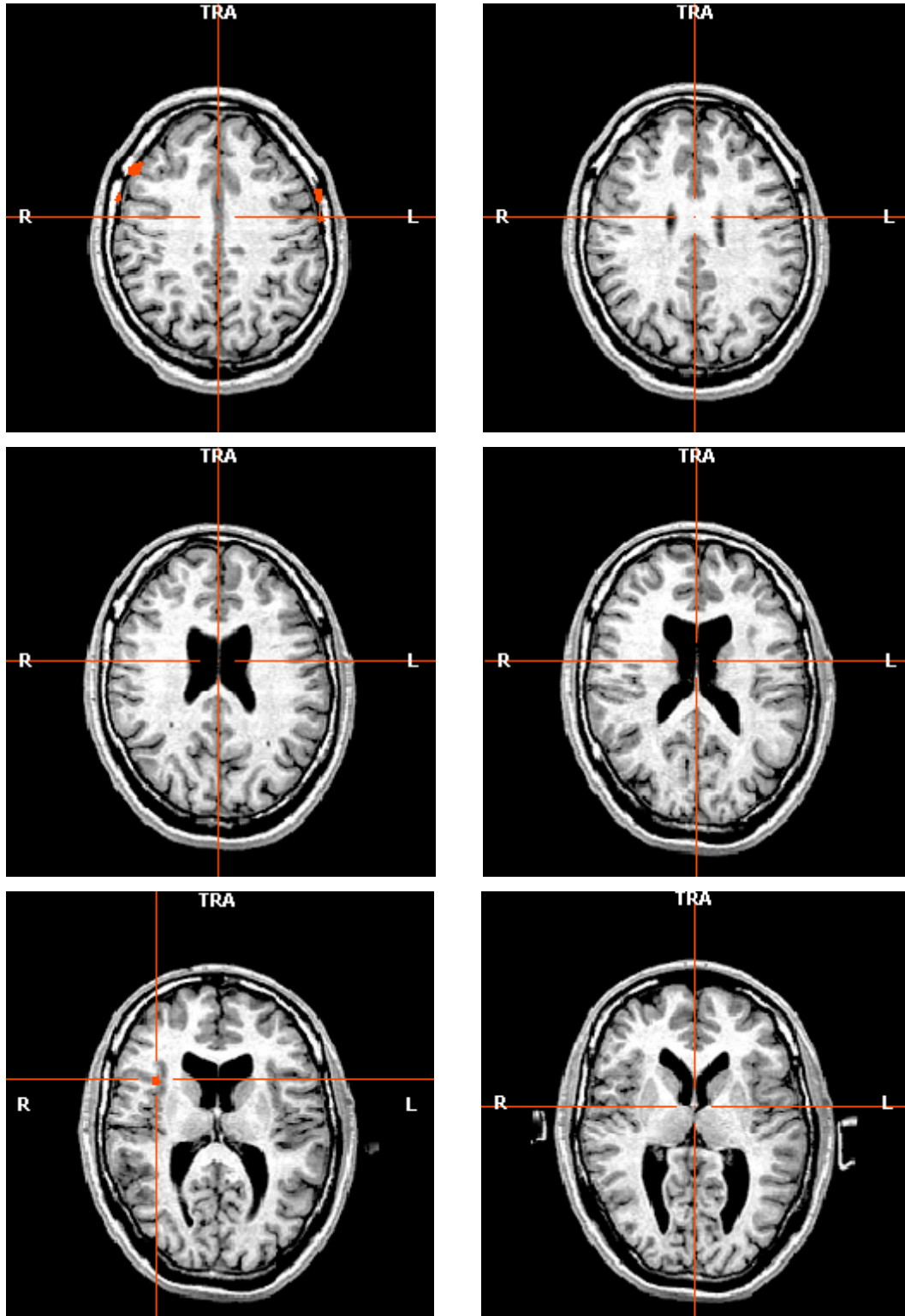
- 1) Melodie und Rhythmus original
- 2) Melodie neu; Rhythmus original wie in M 1
- 3) Melodie original wie in M 1; Rhythmus neu angeordnet
- 4) beide Elemente neu angeordnet (randomisiert)

Wie bereits erwähnt, wurden die Signifikanzniveaus ausgewählt, bei denen sich erstmals überhaupt Voxel darstellen ließen. Dadurch sollte der R- Wert so hoch wie möglich gehalten werden.

Kontrast A: Melodie neu bei gleichem Rhythmus versus Melodie und Rhythmus im Original, i.e. 2) versus 1)

Bei diesem Kontrast zeigte sich eine streng rechtsseitige Aktivierung in den Bereichen der Insel, des Gyrus temporalis inferior, des Gyrus frontalis medius und inferior, pars orbitalis, sowie der rechten temporalen Polregion, siehe Graphik 2 und Tabelle 4. Für die Voxeldarstellung mußte der Koeffizient auf $R > 0.1$ gesenkt werden.

Graphik 2: Kontrast A, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.1$
Voxelzahl 162, x 36, y 14, z 12, Insula rechts.



(Graphik 2 Fortsetzung)

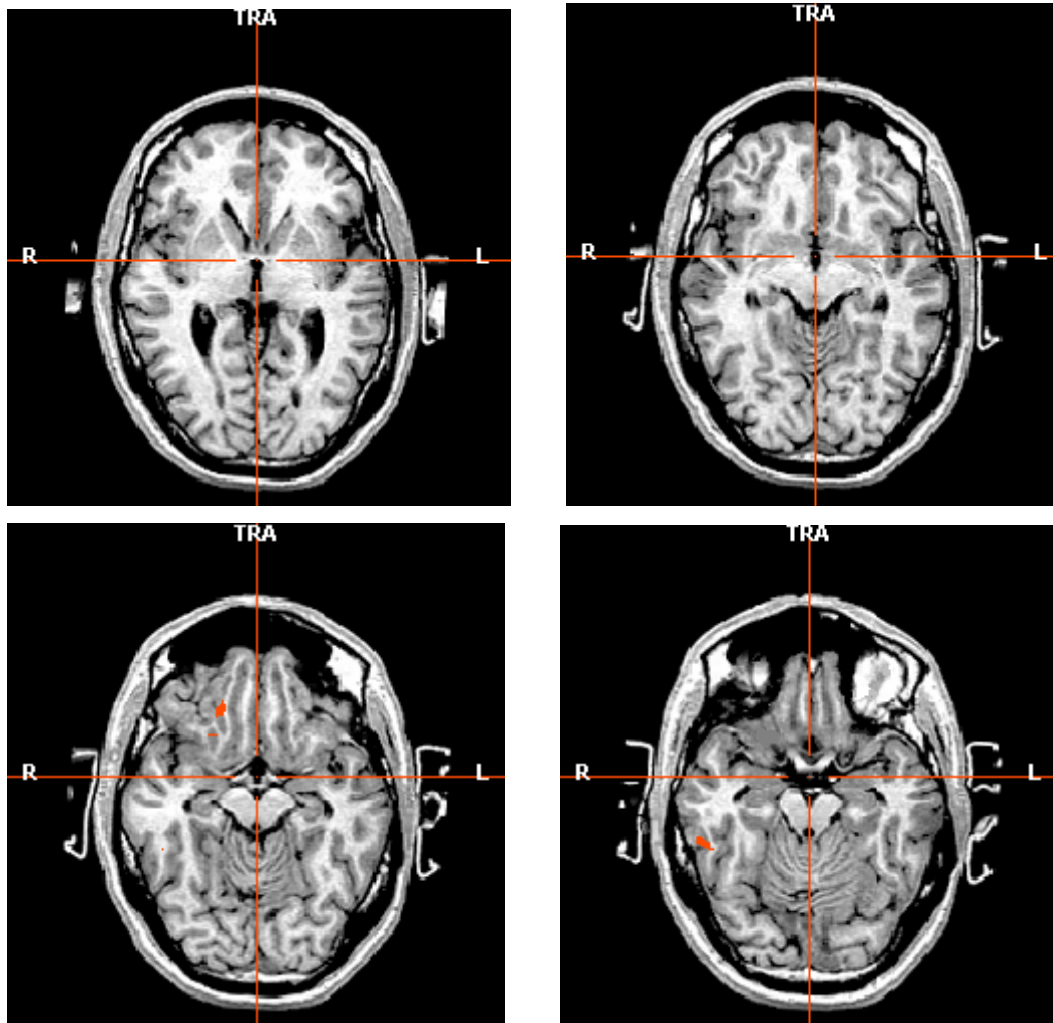


Tabelle 4: Kontrast A): 2) versus 1); Melodie neu bei gleichem Rhythmus versus Melodie und Rhythmus im Original.

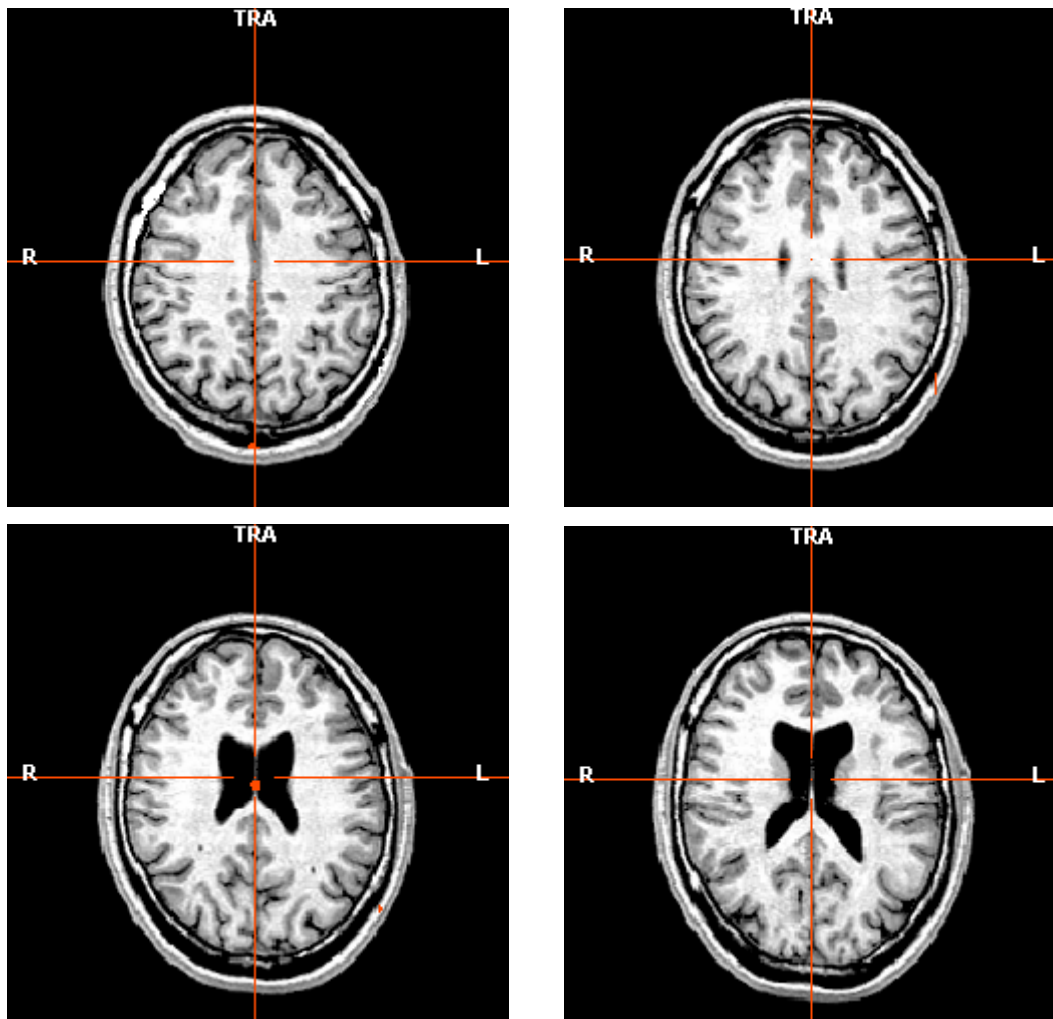
ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
INS	_*	162	36	14	12	0			
GTi (4)	20	155	52	-34	-12	0			
GFm	11	133	18	32	-9	0			
GFi	47	304	21	19	-13	0			
GTs (Pol)	38	203	29	5	-23	0			

* siehe Kommentar im Anschluß an die Darstellung aller Graphiken

Kontrast B: Melodie original und Rhythmus neu versus Melodie und Rhythmus im Original, i.e. 3) versus 1).

Hier waren aktiv: Gyrus temporalis medius und Gyrus frontalis medius beiderseits sowie Polregion rechts (Gyrus temporalis superior) und Gyrus cinguli linksseitig. Der Koeffizient mußte für die Darstellung dieser Regionen auf $R > 0.125$ gesenkt werden, siehe Graphik 3 und Tabelle 5.

**Graphik 3: Kontrast B, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.125$
Voxelzahl 135, x -6, y 30, z -1, GC.**



(Graphik 3 Fortsetzung)

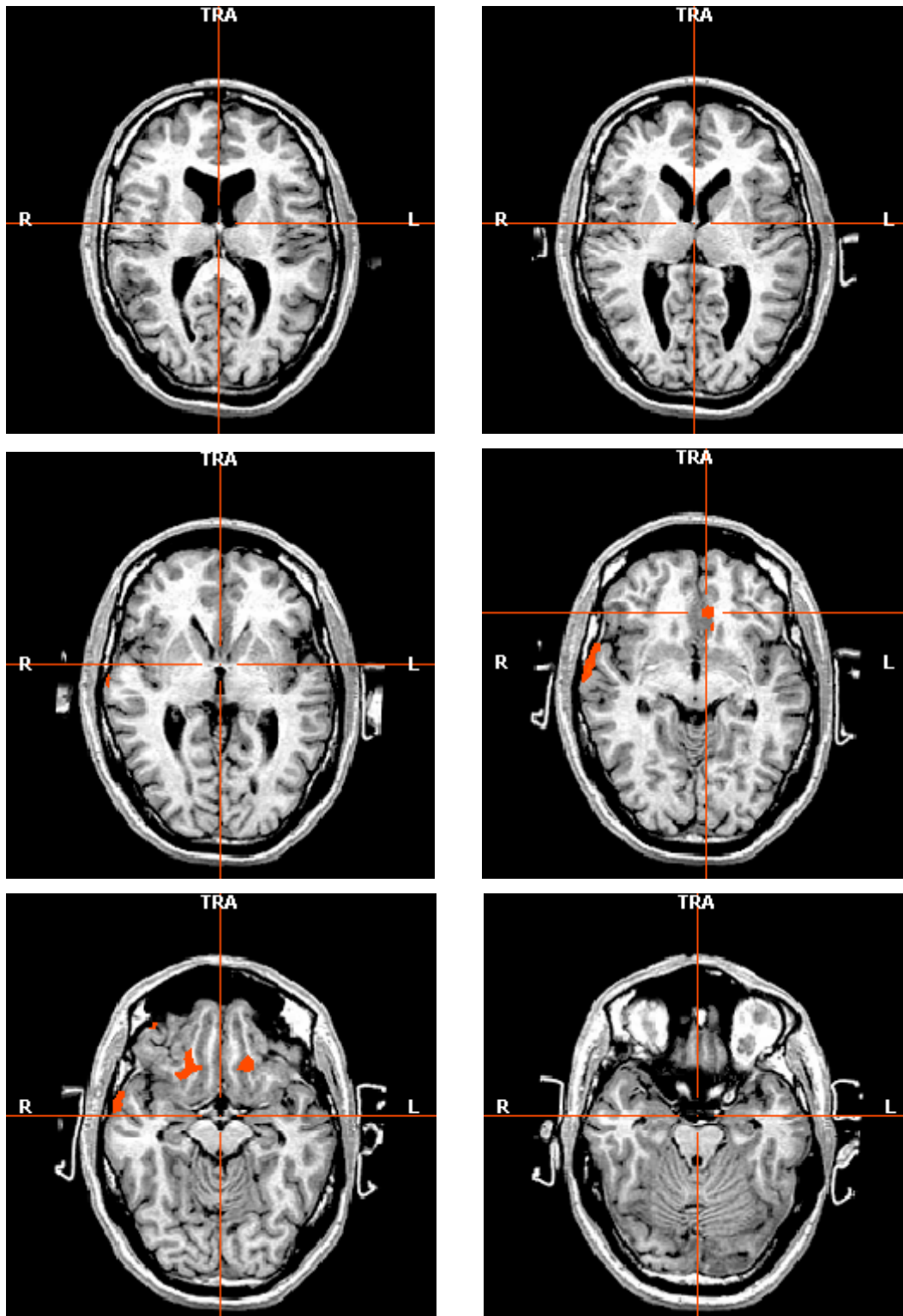


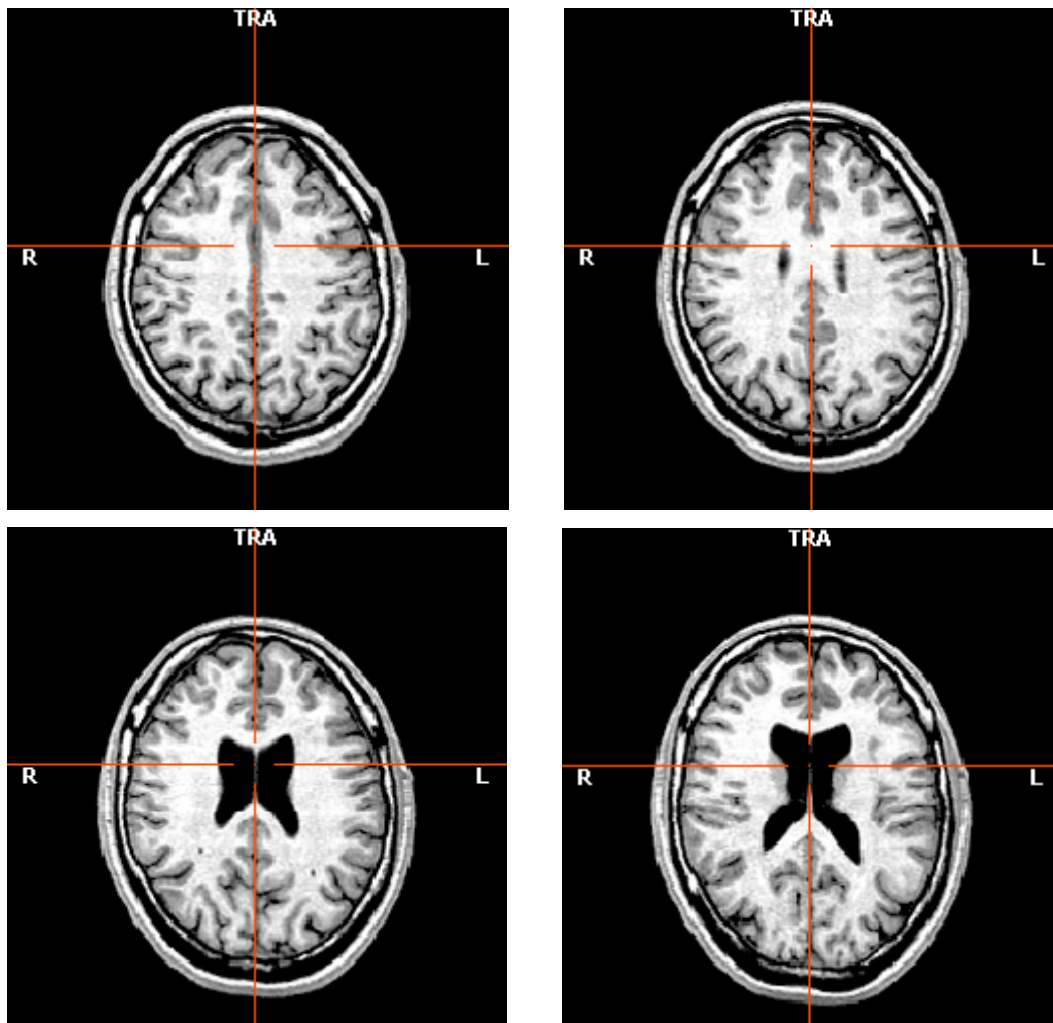
Tabelle 5: Kontrast B): 3) versus 1), $R > 0.125$; Melodie im Original und Rhythmus neu versus Melodie und Rhythmus im Original.

ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
GTm (4)	37	638	18	23	-10	541	-13	24	-8
GFm	9/10	183	45	-32	-16	861	-45	-39	-18
GTs (Pol)	38	624	41	21	-19	0			
GC	32	0				135	-6	30	-1

**Kontrast C: Komplett randomisierte Fassung versus Melodie und Rhythmus
im Original, i.e. 4) versus 1).**

Bis auf den Gyrus cinguli der rechten Seite, fanden sich hier nur Aktivierungen der linken Hirnhälfte. Diese waren: Gyrus temporalis medius und inferior, der Gyrus praecentralis, Gyrus frontalis superior und Gyrus frontalis inferior, pars orbitalis. Der Koeffizient lag bei dieser Auswertung wiederum bei $R > 0.125$, siehe Graphik 4 und Tabelle 6.

**Graphik 4: Kontrast C, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.125$
Voxelzahl 578, x 26, y 18, z -8, GC.**



(Graphik 4 Fortsetzung)

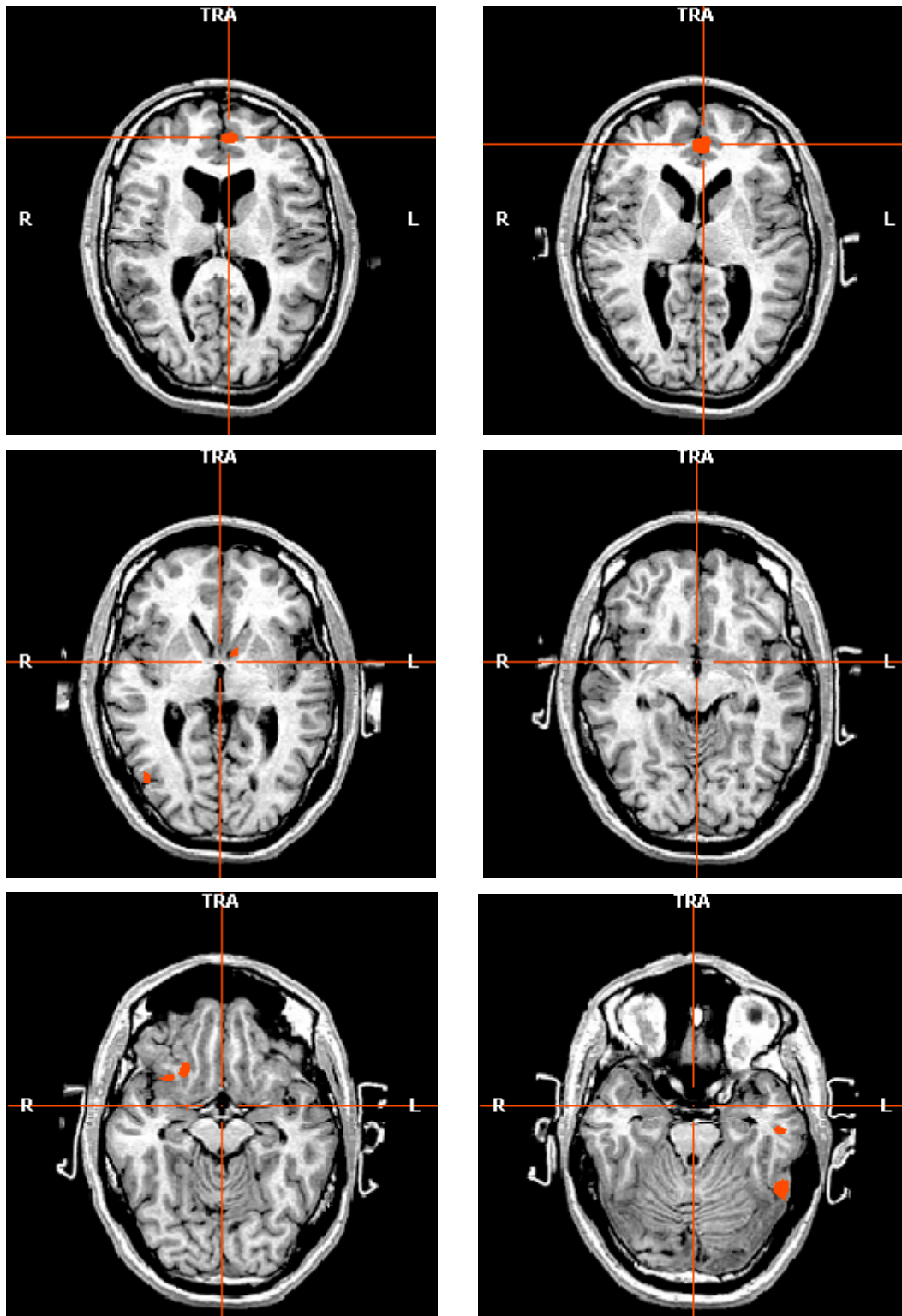


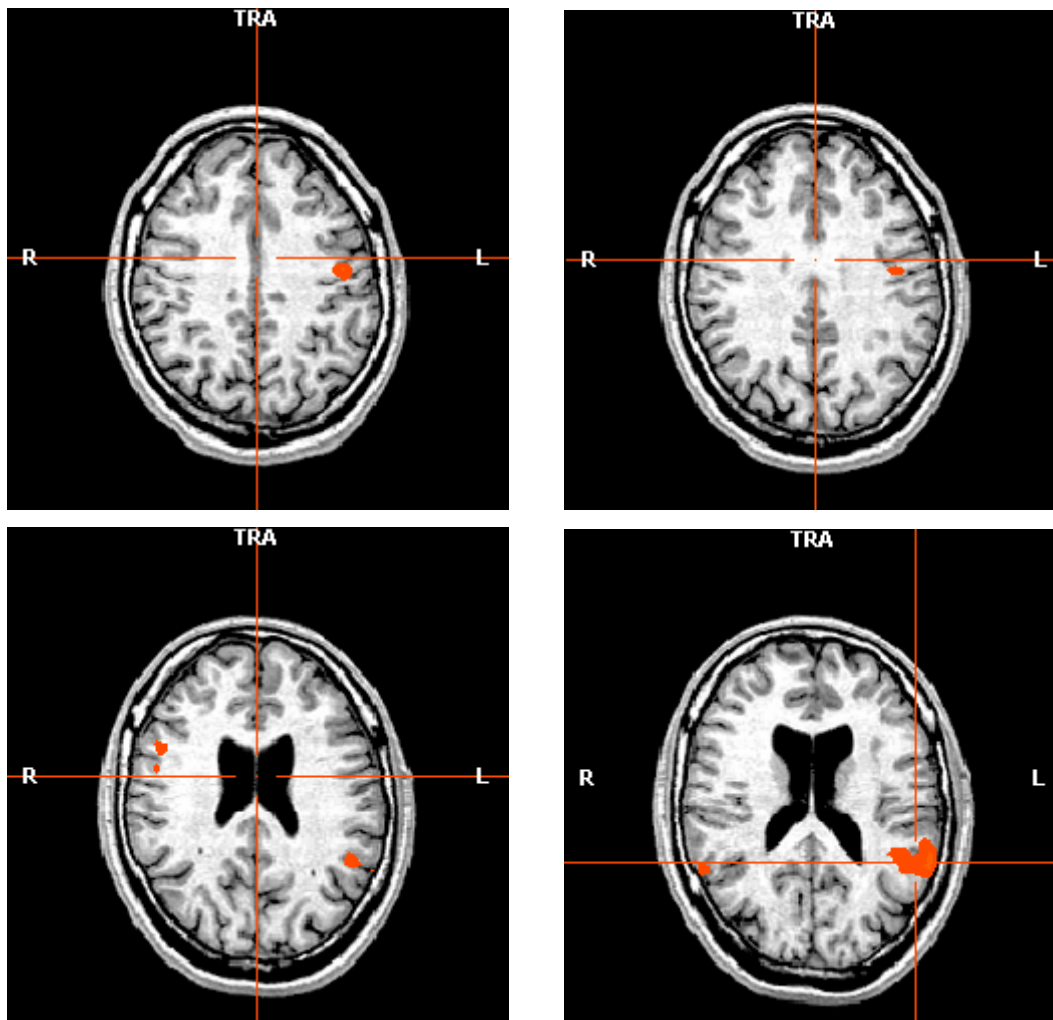
Tabelle 6: Kontrast C): 4) versus 1), $R > 0.125$; Komplet randomisierte Fassung versus Melodie und Rhythmus im Original.

ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
GTm (3)	21	0				490	-32	-13	62
GTi (4)	37	0				668	-10	32	55
GPrC (7)	4/6	0				1676	-3	44	9
GFs	8	0				469	-50	-47	-18
GFi	47	0				129	-49	-13	-15
GC	32	578	26	18	-8	0			

Kontrast D: Melodie und Rhythmus im Original versus komplett randomisierte Fassung, i.e. 1) versus 4).

Bei diesem Kontrast ergaben sich Aktivierungen in 4 Hirnregionen: Gyrus temporalis medius, superior beiderseits, Gyrus praecentralis links und Gyrus frontalis inferior, pars opercularis rechts. Der Wert des Koeffizienten lag hier bei $R > 0.25$, siehe Graphik 5 und Tabelle 7.

**Graphik 5: Kontrast D, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.25$
Voxelzahl 7367, x 51, y -31, z 5, GTs.**



(Graphik 5 Fortsetzung)

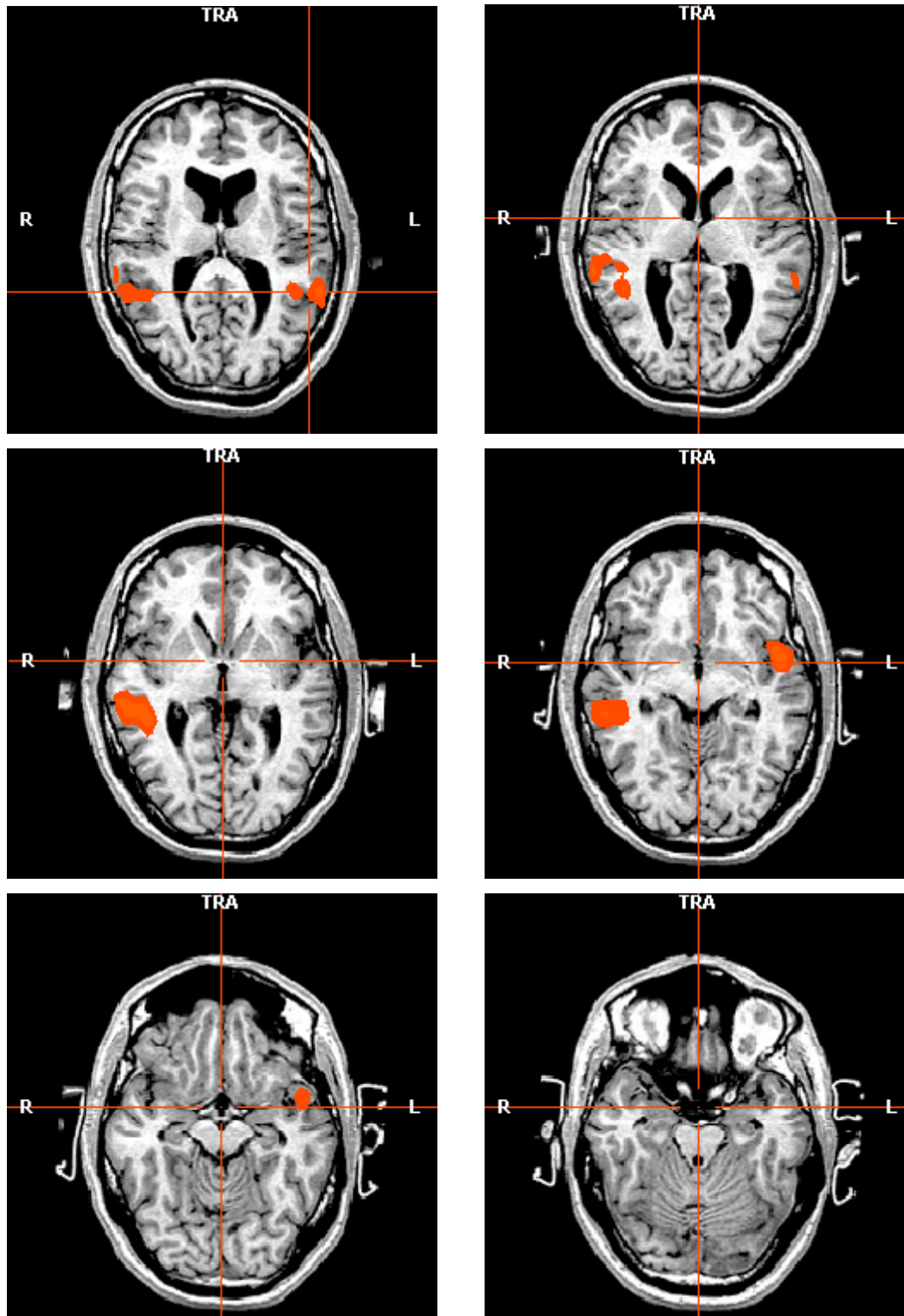


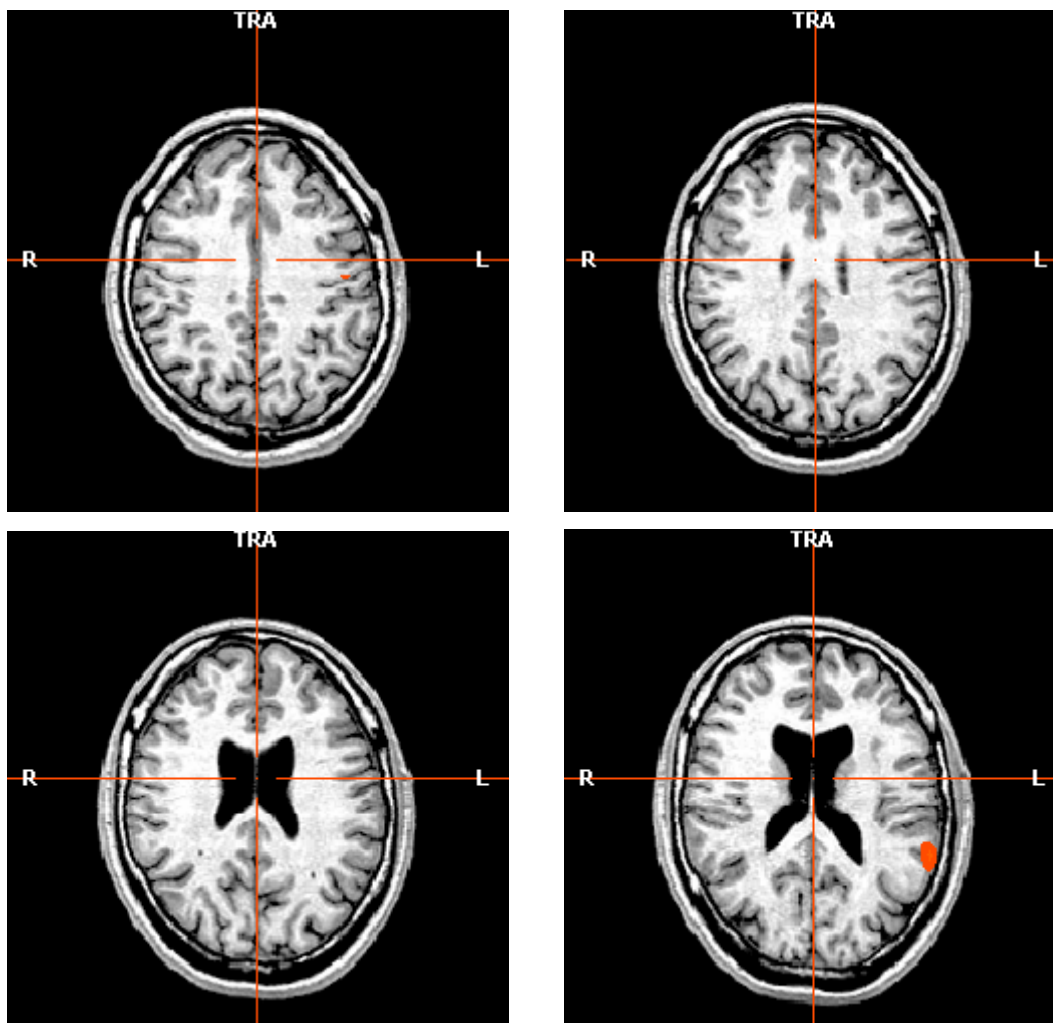
Tabelle 7: Kontrast D): 1) versus 4), $R > 0.25$; Melodie und Rhythmus im Original versus komplett randomisierte Fassung.

ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
GTm (3)	21	258	44	-7	48	941	-42	-6	41
GTs (2)	22	7367	51	-31	5	3525	-51	-40	17
GPrC (7)	4/6	0				2022	-47	4	-3
GFi	44	361	49	13	24	0			

Kontrast E: Melodie und Rhythmus im Original versus Melodie neu bei gleichem Rhythmus, i.e.: 1) versus 2).

Hier fanden sich die aktiven Voxel im Bereich der transversen Gyri im Temporalhirn beiderseits, im G. temporalis medius der rechten und in der Polregion der linken Seite. Der Koeffizient liegt bei 0.3. Siehe Graphik 6 und Tabelle 8.

**Graphik 6: Kontrast E, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.3$
Voxelzahl 3306, x 53, y -27, z 5, GTT, GTs.**



(Graphik 6 Fortsetzung)

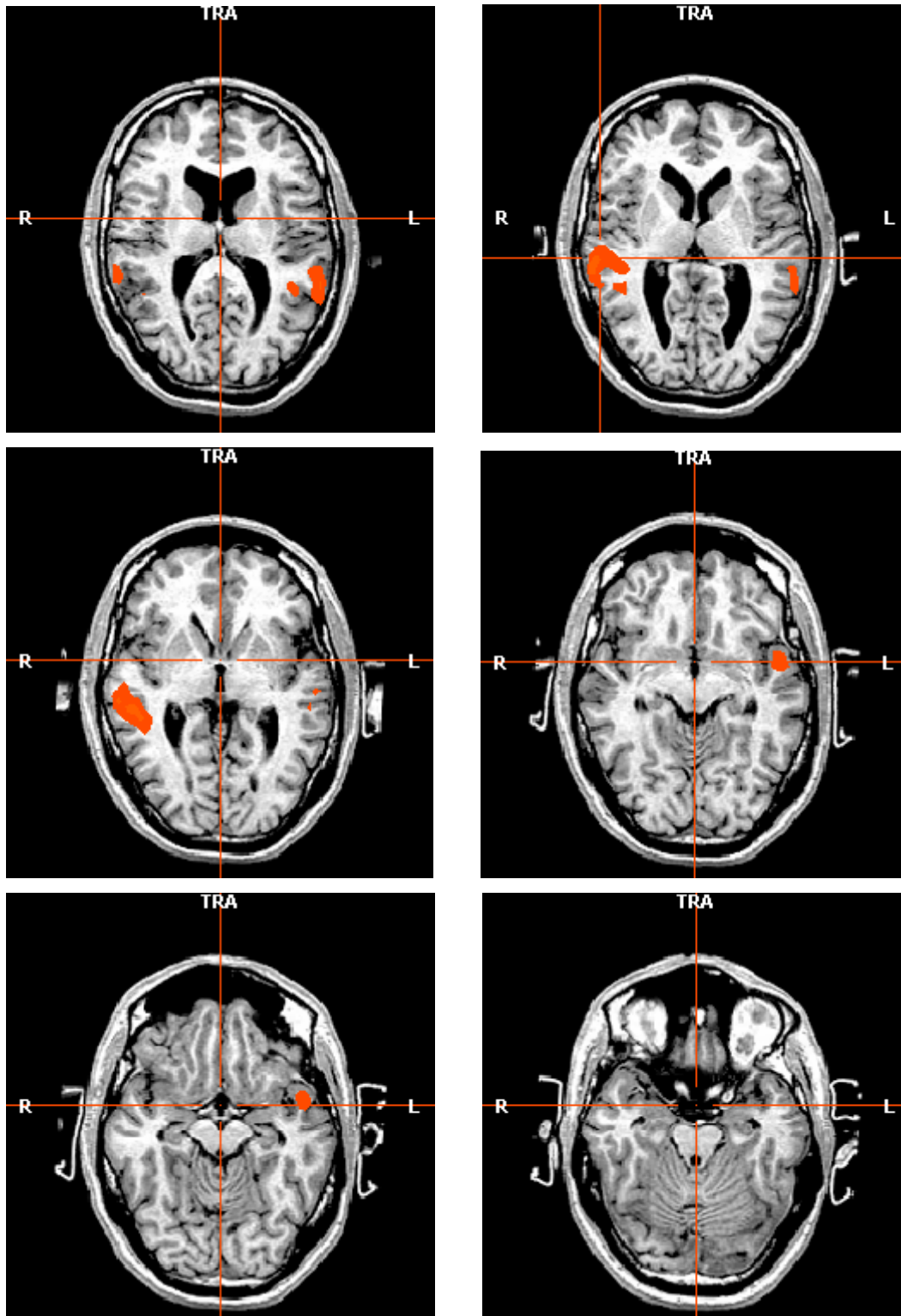


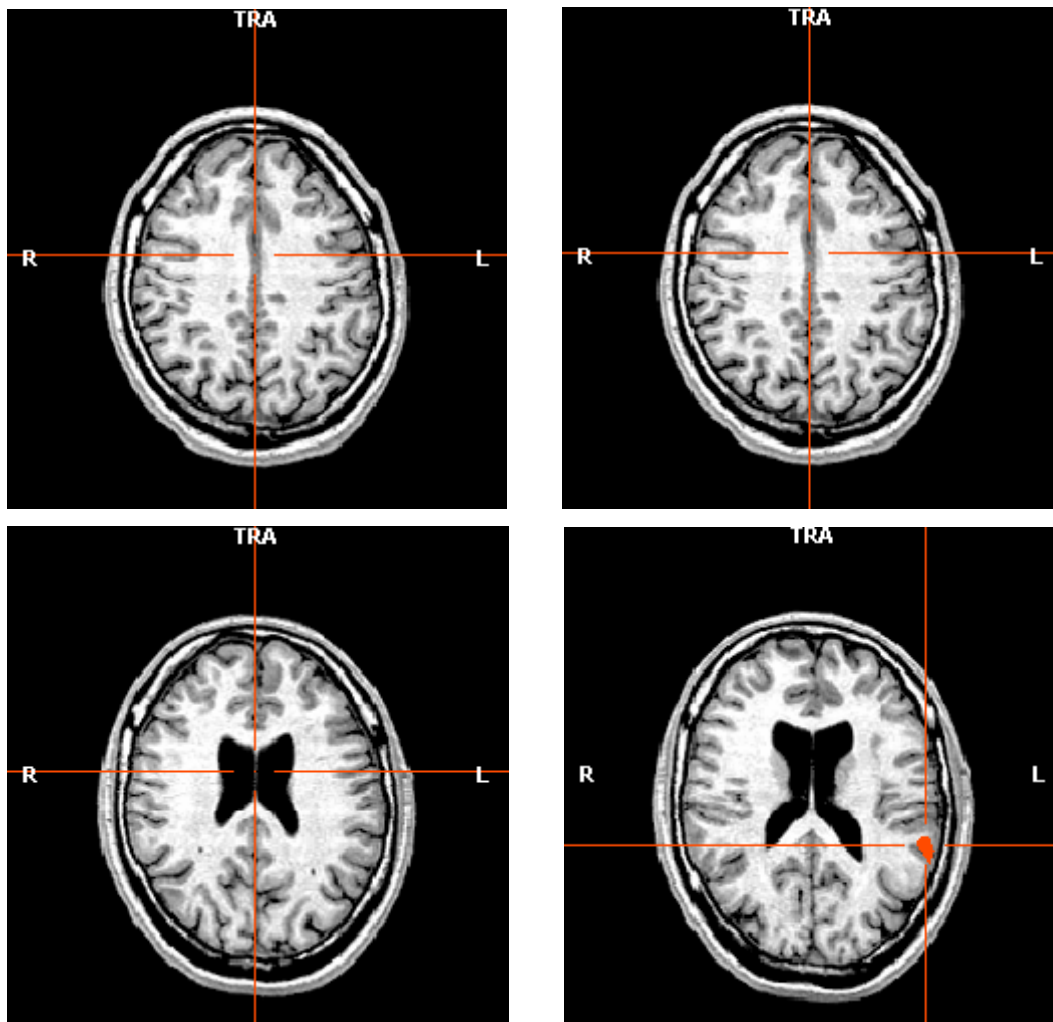
Tabelle 8: Kontrast E): 1) versus 2), $R > 0.3$; Melodie und Rhythmus im Original versus Melodie neu bei gleichem Rhythmus.

ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
GTT, GTs (1)	41,42, 21	3306	53	-27	5	2188	-55	-35	14
GTs (Pol)	38	0				731	-48	2	-5
GTm (3)	21	1215	51	-29	3	0			

Kontrast F: Melodie und Rhythmus im Original versus Melodie im Original und Rhythmus neu, i.e. 1) versus 3).

Bei einem Koeffizienten von >0.3 ergaben sich hier die folgenden Aktivitäten lediglich im Gyrus temporalis superior ohne Beteiligung der Heschel'schen Querwindungen. Siehe Graphik 7 und Tabelle 9.

**Graphik 7: Kontrast F, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.35$
Voxelzahl 767, x -55, y -36, z 17, GTs.**



(Graphik 7 Fortsetzung)

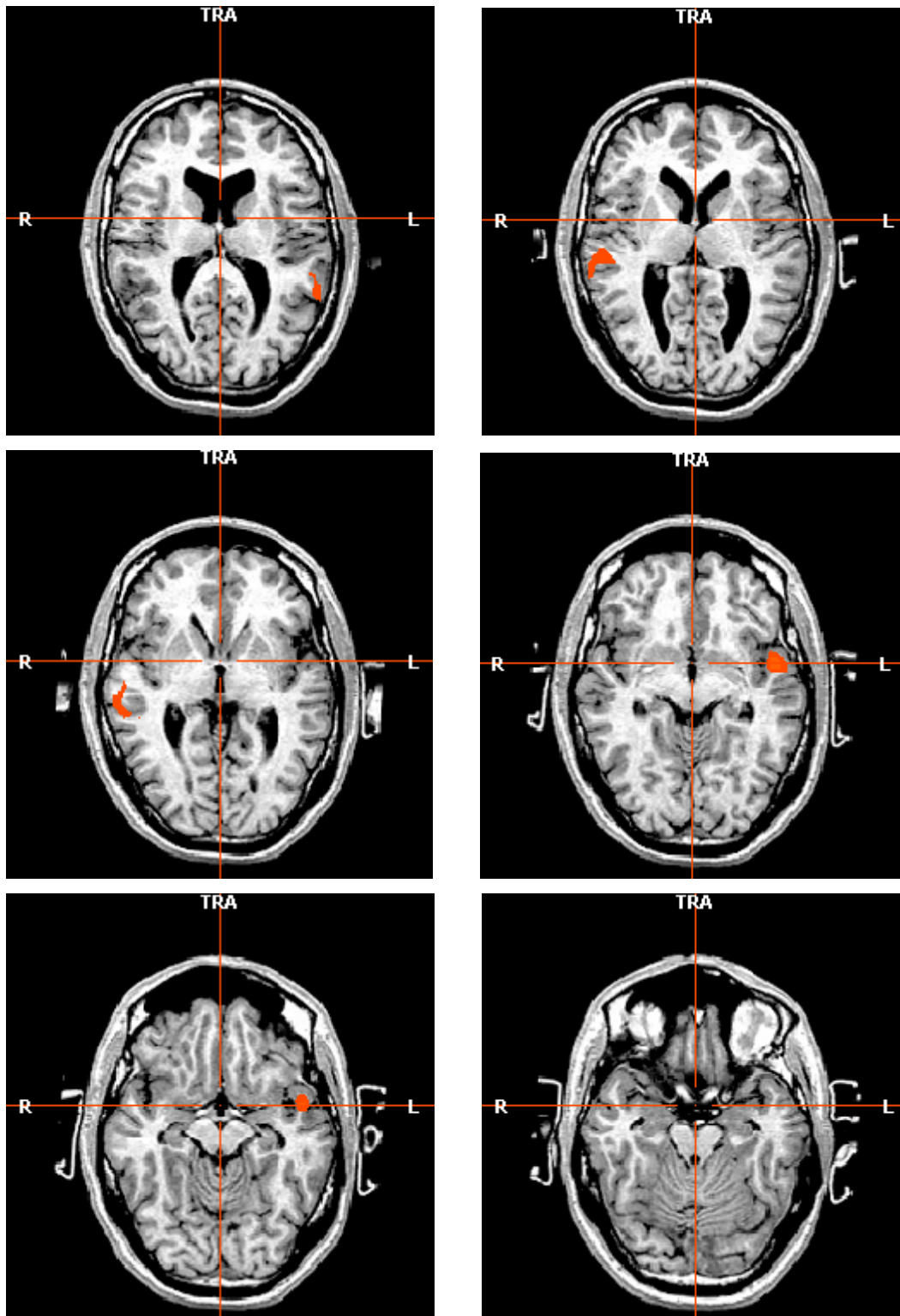


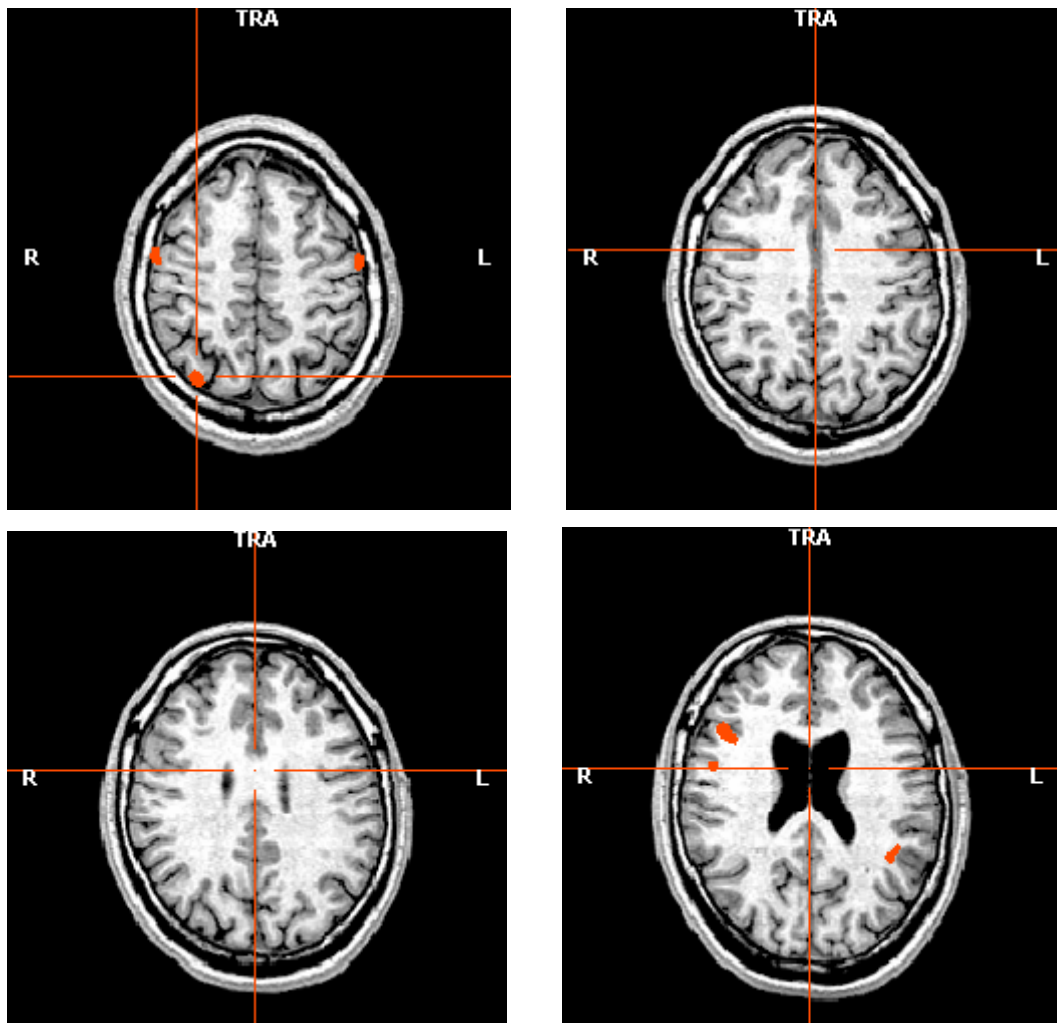
Tabelle 9: Kontrast F): 1) versus 3), $R > 0.35$; Melodie und Rhythmus im Original versus Melodie im Original und Rhythmus neu.

ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
GTs (1)	22	1163	56	-22	5	767	-55	-36	17
GTs (2)	22	0				946	-48	1	-3

Kontrast G: Melodie im Original und Rhythmus neu versus Melodie und Rhythmus randomisiert, i.e. 2) versus 4).

Um bei dieser Bedingung Aktivitäten zu finden, mußte der Koeffizient erneut auf 0.15 gesenkt werden. Es finden sich Voxel im G. temp. superior links sowie im G. temp. medius rechts. Außerdem beiderseits in der Präzentralregion (GPrC) und den Gyri frontales inferiores und medii (GF_i, GF_m) sowie dem Lobus parietalis superior (LPs).

**Graphik 8: Kontrast G, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.15$
Voxelzahl 209, x 31, y -60, z 49, LPs.**



(Graphik 8 Fortsetzung)

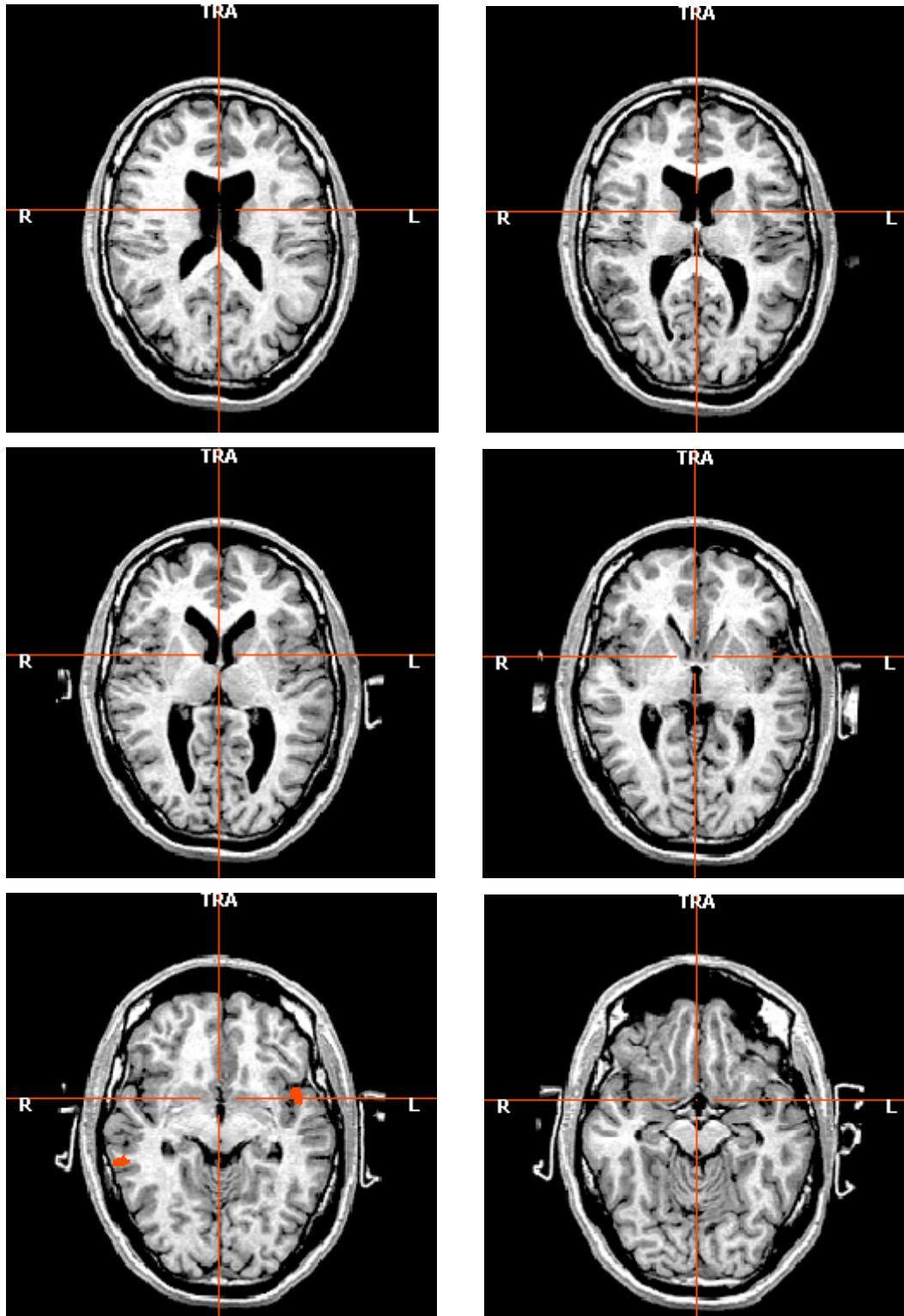


Tabelle 10: Kontrast G): 2) versus 4), $R > 0.15$; Melodie im Original und Rhythmus neu versus Melodie und Rhythmus randomisiert.

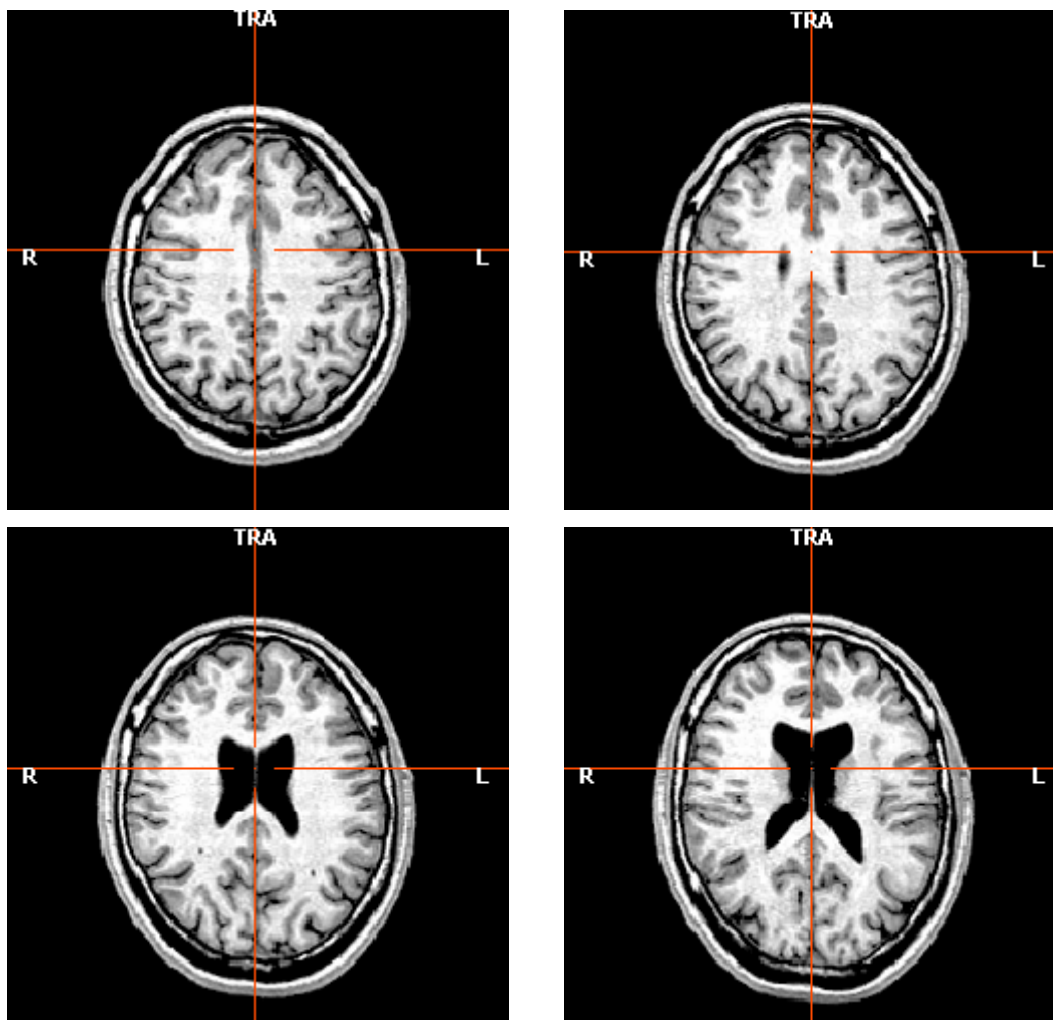
ROI	Brod- mann	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
GTs (2)	22	0				263	-44	6	-1
GTm (3)	21	100	58	-32	-1	0			
GPrC (7)	4	196	51	1	47	228	-49	0	47
GFi	44	128	48	6	26	0			
GFm	9	136	43	22	25	0			
LPs	7	209	31	-60	49	0			

Hinweis: Bei der Graphik wurde noch eine Schicht höher begonnen um die Aktivierungen in der Präzentralregion zu erfassen. Die unterste Schicht fehlt dementsprechend. Die Abschnitte dazwischen sind identisch mit den anderen Graphiken.

Kontrast H: Melodie neu und Rhythmus im Original versus Melodie und Rhythmus randomisiert, i.e. 3) versus 4).

Beim letzten Kontrast fand sich lediglich Aktivität im G. temporalis medius rechts. Der Koeffizient mußte auch hier auf unter 0.2 gesenkt werden.

**Graphik 9: Kontrast H, Minimum der Clustergröße = 100, $R > 0.15$
Voxelzahl 276, x 44, y -30, z 5, GTm.**



(Graphik 9 Fortsetzung)

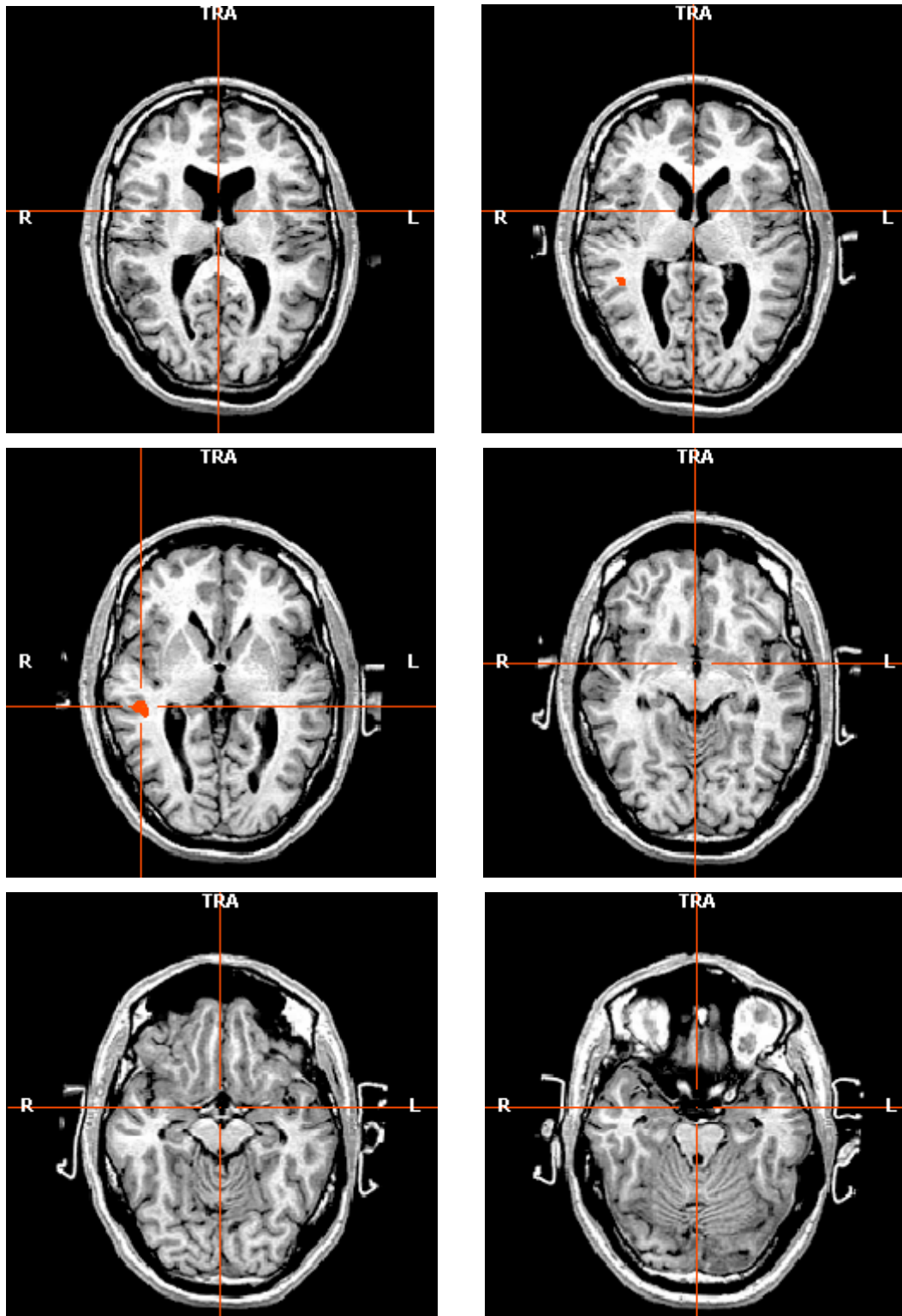


Tabelle 11: Kontrast H): 3) versus 4), $R > 0.15$; Melodie neu und Rhythmus im Original versus Melodie und Rhythmus randomisiert.

ROI	Brod-	Voxel re	X	Y	Z	Voxel li	X	Y	Z
	mann								
GTm (3)	21	276	44	-30	5	0			

*** Kommentar zu Kontrast A:**

Die Insula Region hat eine nicht völlig klare Funktion. Abgesehen von viszerale Sensationen bei Elektrodenreizung (Kahle, 2000). Eine Einteilung nach Brodmann am menschlichen Kortex existiert nicht (Braak, 1994).

Wenn man davon ausgeht, daß $R > 0.5$ ein sehr konservativer Wert ist waren nur bei den Kontrasten D, E und F mit der Originalversion als ON-Bedingung näherungsweise verwertbare Ergebnisse ($R > 0.25-0.35$) in Hinblick auf die Voxel nachzuweisen. Um aber der kompletten Untersuchung gerecht zu werden, sind dennoch alle berechneten Kontraste aufgeführt.

Bei Kontrast D fällt auf, daß nicht die transversen Gyri aktiv waren, sondern hauptsächlich die hinteren oberen Anteile des G. temp. sup. Sowie Anteile des G. temp. med.. Die Voxel im G. temp. inf. lagen rechtsseitig und entsprechen dem Brodmann Areal 44. Ein Bereich also, der als Broca-Region gilt. Hinzu kommt eine Aktivierung des linken G. praecentralis.

Bei Kontrast E zeigten sich rechtsbetont die primären und nachgeordneten Rindengebiete des auditorischen Kortex aktiviert. Zusätzlich linksseitig Voxelcluster am temporalen Pol und somit am ehesten dem G. temp. sup. und dem Brodmann Areal 38 zuzuordnen.

Bei Kontrast F konnte man lediglich eine rechtsbetonte Aktivierung der primären Hörbereiche feststellen. Aktive Voxel im Bereich der Präzentralregion fanden sich hier nicht.

Weitere Analysen der anderen Kontraste sind nicht zulässig, da das Signifikanzniveau zu niedrig war (siehe Diskussion Kap. 7).

7. Diskussion

Es ist natürlich schwer, Dinge zu trennen, die eigentlich zusammen gehören. Es sollte aber versucht werden, eine getrennte Begutachtung von Melodie und Rhythmik vorzunehmen. Man wird sich schwer tun, diese Reize als echte Musik zu bezeichnen. Schnell vermißt man Harmonik und einen größeren Zusammenhang. Um einzelne Bestandteile von musikalischer Wahrnehmung zu untersuchen, hilft es jedoch nicht direkt die Wirkungen einer Sinfonie von Gustav Mahler oder eines Konzertes von Madonna im MRT sehen zu wollen. Es bleibt zu versuchen, sich kleinen Bausteinen und somit den einzelnen Komponenten von Musik zu nähern ohne jedoch zu sehr bei Einzelton-Paradigmen zu bleiben, wie auch schon kritisiert wurde (Sergent, 1993 (1)). Diese Studie ist ein Versuch dieses zu tun.

Zunächst ist zu bemerken, daß sich in der Übersicht über die hochsignifikanten Aktivitäten der einzelnen ROI (Einzelanalyse $p > 0.0001$ (korrigiert)) keine generelle Asymmetrieneigung nachweisen ließ. Frühere Studien wie eine von Mazziotta et al. von 1982 konnten eine Asymmetrie bei Ton- und Timbrewahrnehmung im Positronen Computer Tomographen (PCT) nachweisen. Diese Studie, wie auch andere, ist mit einem aktiven Paradigma entstanden, was bei der vorliegenden bewußt vermieden wurde. Übereinstimmend wurde z.B. für Timbrebeurteilung eine rechtshirnige Verarbeitungsstrategie postuliert (Mazziotta, 1982; Samson, 1994; Platel, 1997).

Auch in einer Untersuchung mit Trans-Cranieller-Doppler-Sonographie (TCD) wurde bei analytischen Aufgabestellungen bezüglich einer Bach'schen Fuge eine signifikante Mehrdurchblutung der rechten A. cerebri media gefunden (Vollmer-Haase, 1998).

Da es in der aktuellen Studie aber um Melodie und Rhythmus ging, seien nun andere Ergebnisse dieser Untersuchungen mit PCT und PET Grundlage für die Diskussion.

Regelmäßig wurde bei den oben genannten Untersuchungen gezeigt, daß im Bereich der transversen Gyri und des G. temp. superior und medius signifikant aktive Areale zur Darstellung kamen, wenn es um auditorische Reize ging.

Diese Feststellung ist nicht neu, unterstreicht aber noch einmal im Hinblick auf die hier durchgeführten Kontrast-Berechnungen die Rolle der prim. Hörrinde als offensichtlich erste kortikale Repräsentationsstelle der Hörbahn. Sehr deutlich ist diese Tatsache auch in der vorliegenden Gruppenauswertung zu erkennen. Zatorre (1988) postulierte bereits die essentielle Rolle des temporalen Kortex für Töne und auch für Liedererkennung (1993).

Ein aktiver G. fusiformis, ließ sich beim passiven Zuhören ebenfalls nachweisen (s. Tab. 3, S.42). Allerdings fand sich diese Aktivität nur links, während Zatorre in einem passiven PET Paradigma rechtsseitig eine Zunahme neuronaler Arbeit feststellte (Zatorre, 1994). Laut Talairach und Tournoux (1988) ist diese Region (37 n. Brodmann) als audiovisuelle Assoziationsregion anzusehen. Ob dies unter Umständen als ein Ausdruck von Emotionen oder Bildern im Kopf der Probanden zu werten ist, läßt sich nicht eindeutig sagen. Eine zusätzliche Befragung der VPn wäre also u.U. notwendig.

Beim aktiven Zuhören fand Zatorre außerdem Regionen im Cerebellum, G. cinguli und G. temp. inf./sup.. Während sich bei der vorliegenden Studie bei den Kontrastberechnungen nur eine Aktivierung des G. temp. inf. rechts beim Kontrast D (Original vs. Random) darstellen ließ, wurden keine cerebellären oder cingulären Aktivierungen gefunden. Ein Kontrast ist allerdings auch nicht vergleichbar mit einer gestellten Aufgabe bei einem Versuch, da es hierbei nicht um eine Lösungsstrategie ging sondern „nur“ ums Zuhören.

Bezogen auf die Rhythmusbedingungen konnte keine signifikante Aktivität nachgewiesen werden. Mag es an der nicht gestellten Aufgabe, den Rhythmus bewußt zu beurteilen und mit der Ausgangsmelodie zu vergleichen liegen, oder an einer zu geringen zeitlichen Auflösung der mikrovaskulären Ereignisse. Auch in Frage kommt, daß die VPn in der Kürze der Zeit und bei einer sehr ungewohnten Umgebung nicht wirklich auf die Musik konzentriert waren und ihnen so die Unterschiede der verschiedenen Reize nicht bewußt wurden. Gerade das war aber auch die Frage, denn die Hirnaktivitäten repräsentieren ja nicht nur bewusste mentale Prozesse. Obwohl musikalisch geschult ist es denkbar, daß einem die Gleichartigkeit oder Verschiedenheit der Rhythmik und der Melodie nicht auffällt. In so einem Fall ist es ggf. besser mit aktiver Beteiligung der Probanden zu arbeiten und Verhaltenstests so einer Studie voran zu stellen bzw. auch mit einer Befragung der VPn über Empfindungen zu schließen.

Was das Zeitempfinden betrifft, essentiell für Rhythmuswahrnehmung, konnte Rao (2001) in einer f-MRT Studie kortikale Areale nachweisen, die bei der Beurteilung von Zeitabständen zwischen zwei Tönen aktiv wurden. Dieses waren der linke prämotorische Kortex (Area 6 n. Brodmann), die temporalen Kortexregionen beiderseits n. Brodmann 21 /22 sowie der G. angularis.

Vor diesem Hintergrund könnte man die aktive Präzentralregion bei Kontrast D als Zunahme von Aktivität bei geordnetem Rhythmus und Melodie im Vergleich zur Randomversion deuten, bei der nur ein chaotischer Rhythmus vorkommt. Vielleicht hat es aber auch nichts miteinander zu tun. Das diese Aktivität wie bei Rao linkshemisphärisch ist, ist nur fraglich die Übereinstimmung zweier Ergebnisse!

Hier ist die Grenze zur Spekulation überschritten da nur 6% der Varianz in dem Signal auf die experimentelle Manipulation zurückgeführt werden können. Zum Vergleich gibt es aber auch nur wenige Studien, die ebenfalls die Probanden passiv Musik hören ließen.

Wie soll man aber kontrollieren was Versuchspersonen bei einer Beurteilung noch alles denken? Da es sich um Zufälle handelt, mittelt sich die Aktivierung heraus. Das wäre ein Gegenargument.

Die drei Kontrastergebnisse D, E und F unterstreichen letztlich nur die Rolle des Temporallappens beim Musikhören da die Mehrzahl der anderen Kontraste, die eigentlich Aufschluß über eventuelle Verarbeitung geben sollte, keine signifikanten Werte lieferte. Allerdings zeigt sich, dass die Signifikanzniveaus hier bei der Ursprungsmelodie noch höher liegen als bei den anderen Kontrasten. Die p Werte müssen in Bezug auf die R Werte gelesen werden. Bei einem R von 0.15 beruhen lediglich 2% der Varianz auf der Manipulation des Experiments auch wenn der p Wert mit $>3.9 \cdot 10^{-37}$ gegen 0 geht. Bei D sind es, wie schon gesagt 6 %, bei E 9% und bei F immerhin 12% der Varianz.

Die Rolle des Broca-Areals bei Kontrast D bleibt also ebenfalls fraglich, obwohl in einer Studie von Platel (1997) diese Region bei einer Rhythmusanalyse beteiligt schien. Auch hier handelte es sich um ein aktives PET-Paradigma. Es wurde zusätzlich eine Aktivierung des Cuneus (Brodmann Areal 18/19) bei Tonhöhenvergleichen gefunden.

Wie in Tab. 2 und 3 zu sehen, ist eine Beteiligung dieser optischen Zentren auch in der Gruppenanalyse nachweisbar. Möglicherweise handelt es sich hier um Effekte eines „Imaging“ der Probanden. Äußere optische Reize waren ja ausgeschlossen.

Vor diesen Hintergrund wären auch die Voxel im Lobus parietalis und supramarginalis zu erklären, die über Verbindungen zur Regio 18/19 verfügen (Talairach und Tournoux, 1988) und assoziative Funktionen haben sollen. Binder konnte diesen Umstand 1996 ebenfalls nachweisen als es um passives Zuhören bei einem f-MRT Versuch ging. Dabei wurde außerdem festgestellt, daß Töne und Sprache das Planum temporale beim bloßen Zuhören gleich stark aktivierten. Ein Faktum, welches erneut die Bedeutung der primären Hörzentren unterstreicht.

Es kann also nicht mehr bestritten werden, daß im Gyrus temporalis superior die Höreindrücke ankommen und wahrscheinlich weiter durch neuronale Verschaltungen analysiert werden. Yves Berthezène (1997) zeigte diesen Zusammenhang sogar bei postlingual ertaubten Patienten mit einem Cochlear Implant. Im f-MRT wurde bei elektrischer Stimulation der Cochlea der G. temp. superior aktiviert.

Wie aber soll man die weiteren Verschaltungen zuverlässig nachverfolgen?

Justine Sergent (1993 (1)) gibt zu bedenken, daß es natürlich keine Garantie für eine funktionelle Einteilung im Gehirn gibt, die unseren intellektuellen Vorstellungen von Musik und ihren theoretischen Modellen entspricht. Also keine Garantie zwingend ein anatomisches Korrelat dieser musiktheoretischen Konzepte zu finden! Dieses hat die hier durchgeführte Arbeit deutlich gezeigt.

Das viele Studien mit hirnerkrankten und/oder operierten Patienten gearbeitet haben heißt ebenfalls nicht, daß die Lokalisation der Defekte mit einem Rückschluß auf die Repräsentation von Funktionen zwingend logisch ist.

Zu der hier durchgeführten Studie wäre noch kritisch zu bemerken, daß eine Audiometrie aller VPn und Musikalitätstests das methodische Bild abgerundet hätten. Die Unterteilung der ersten 3 Regionen (ROI) erwies sich im nachhinein als unwesentlich da keine signifikanten, isolierten Aktivitäten darstellbar waren.

Im Grunde steht man mit den jetzt verfügbaren Mitteln der funktionellen Hirnforschung vor vielen, vielversprechenden Möglichkeiten. Ein Problem könnte aber die Plastizität des Gehirnes und die großen interindividuellen Unterschiede sein. Gerade in der musikalisch orientierten Hirnforschung ist schon mehrfach der Verdacht laut geworden, daß man es nicht wie oft vermutet mit abgegrenzten Zentren

des Hirns für genau definierte Aufgaben zu tun haben könnte. Was für einige Ausnahmen, wie z.B. der tonotop geordnete primäre Hörkortex nachgewiesen scheint.

Wenn Eckart Altenmüller 1998 in EEG-Untersuchungen feststellt, daß verschiedene musikalische Lehrkonzepte zu unterschiedlich ausgeprägten neuronalen Netzwerken führen, kann man sich ungefähr die vielen Möglichkeiten des Hirns vorstellen, musikalisches Wissen und erlernte Fähigkeiten abzuspeichern. Hinzu kommt noch, daß dieses Wissen nicht in jeder Situation gleich reproduziert wird sondern vielen Einflüssen unterliegt. Nicht nur Emotionen (die wir noch viel weniger auf ihrer neuronalen Basis verstehen) sind u.U. dafür verantwortlich, daß jeder Musiker oder Sänger ein bestimmtes Werk anders spielt oder singt. Auch in der Musik selbst haben z.B. Veränderungen der Kontur einer Melodie, die Tonhöhen- und Rhythmusveränderungen einen Einfluß auf das Tempoempfinden (Boltz, 1998).

Schlußbemerkung

In der vorliegenden Arbeit konnte eine wie von Isabelle Peretz postulierte fokal/globale Verarbeitung musikalischer Reizverarbeitung ebenso nachempfunden werden wie deutlich abgrenzbare Zentren für Melodie und Rhythmuswahrnehmung.

Das Paradigma mag für diese Fragestellung ungeeignet gewesen sein, in Frage kommt aber auch die hochkomplexe Auflösung der Reizeindrücke in endlose und interindividuell verschiedene neuronale Netzwerke als Ursache des Studienergebnisses. Siehe dazu auch E. Altenmüller: Musik im Kopf. In „Gehirn und Geist“ Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg Nr. 1/2002, Seite 22.

Diese Arbeit war aber in der Lage die Leistungsfähigkeit der f-MRT zu zeigen. Die Bilder der Gruppenauswertung (Graphik 1) demonstrieren die relativ gute Auflösung von Hirnaktivitätsdarstellung und geben präzisen Aufschluß über die Lokalisation von arbeitenden Neuronen.

Mit der funktionellen Magnet-Resonanz-Tomographie steht ein geeignetes Mittel zur Verfügung, gefahrlos weitere Studien zu musikalischen Themen zu unternehmen. Im Vergleich zu Elliott aber, der 1993 feststellte, daß über die auditorischen Hirnregionen nur wenig geforscht worden war (Elliott, 1993), kann man sich heute nicht mehr beschweren. Und das ist sehr erfreulich. Letztlich bleibt aber mit Sicherheit auch in Jahrzehnten noch vieles unklar warum uns „Schall zur Ekstase“ führen kann (Jourdain, 1998).

8. Literaturverzeichnis

Altenmüller E, Beisteiner R: Musiker hören Musik: Großhirnaktivierungsmuster bei der Verarbeitung rhythmischer und melodischer Strukturen. Aus Musikpsychologie, Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Musikpsychologie; Band 12, 1995 Florian Noetzel Verlag Wilhelmshafen

Altenmüller E: Musik im Kopf. In „Gehirn und Geist“ Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg Nr. 1/2002, Seite 22

Altenmüller E, Parlitz D, Gruhn W: Was bewirkt musikalisches Lernen in unserem Gehirn: Zur Neurobiologie musikpädagogischer Prinzipien. In: Musizieren im Zusammenspiel von Greifen und Begreifen. Bastien H.G. (Hrsg.) Schott-Verlag 1998

Auzou P, Eustache F, Etevenon P, Platel H, Rioux P, Lambert J, Lechevalier B, Zarifian E, Baron JC: Topographic EEG activation during timbre and pitch discrimination tasks using musical sounds. Neuropsychologia 1995; 33(1): 25-37

Bekesy G von: Travelling waves as frequency analysers in the cochlea. Nature 1970; 225(239):1207-9

Belin P, Zatorre RJ, Lafaille P, Ahad P, Pike B: Voice-selective areas in human auditory cortex. Nature 2000 Jan 20; 403(6767): 309-12

Berthezène Y, Truy E, Morgon A, Giard MH, Hermier M, Franconi JM, Froment JC: Auditory cortex activation in deaf subjects during cochlear electrical stimulation. Evaluation by functional magnetic resonance imaging. Invest Radiol 1997; 32 (5): 297-301

Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, Rao SM, Cox RW: Function of the left planum temporale in auditory and linguistic processing. Brain 1996; 119 (pt4): 1239-47

Blood AJ, Zatorre RJ, Bermudez P, Evans AC: Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. Nat Neurosci 1999; 2(4): 382-7

Boltz MG.: Tempo discrimination of musical patterns: Effects due to pitch and rhythm structure. *Percept Psychophys* 1998; 60(8): 1357-73

Braak H, Braak E, Petsche H: Architektonik des Isokortex. In Drenckhahn D. und Zenker W. (Eds.), *Benninghoff Anatomie Band 2* (pp. 584 – 602). München 1994, Urban und Schwarzenberg

Brodmann K: *Vergleichende Lokalisationlehre der Großhirnrinde*. 1909. Leipzig: Barth

Clarke S, Bellmann A, Meuli RA, Assal G, Steck AJ: Auditory agnosia and auditory spatial deficits following left hemispheric lesions: evidence for distinct processing pathways. *Neuropsychologia* 2000; 38(6): 797-807

Dawe LA, Platt JR, Racine RJ: Harmonic accents in inference of metrical structure and perception of rhythm patterns. *Percept Psychophys* 1993; 54(6): 794-807

De Charms RC, Blake DT, Merzenich MM: Optimizing sound features for cortical neurons. *Science* 1998; 280: 1439-43

Economo von C, Horn L: Über Windungsrelief, Maße und Rindenarchitektonik der Supratemporalfläche, ihre individuellen und ihre Seitenunterschiede. *Z Neurol Psychiat* 1930; 130: 678-757

Elliott-LL: Functional brain imaging and hearing. *J Acoust Soc Am* 1994 Sept, 96(3): 1397-408

Galaburda A, Sanides F: Cytoarchitectonic organization of the human auditory cortex. *J Comput Neurol* 1980; 190: 597-610

Gitter AH, Preyer S: Eine kurze Geschichte der Hörforschung. IV Physiologie. *Laryngorhinootologie* 1992, 71(2): 110-5

Greenwood DD: A cochlear frequency-position function for several species-29 years later. *J Acoust Soc Am* 1990; 87(6): 2592-605

Imig TJ, Morel A: Tonotopic organization in ventral nucleus of medial geniculate body in the cat. *J Neurophysiol* 1985; 53(1): 309-40 (1)

Imig TJ, Morel A: Tonotopic organization in lateral part of posterior group of thalamic nuclei in the cat. *J Neurophysiol* 1985; 53(3): 836-51 (2)

Jancke L, Schlaug G, Steinmetz H: Hand skill asymmetry in professional musicians. *Brain Cogn* 1997; 34(3): 424-32

Johnstone BM, Patuzzi R, Yates GK: Basilar membrane measurements and the travelling wave. *Hear Res* 1986; 22: 147-53

Jourdain R: Das wohltemperierte Gehirn: Wie Musik im Kopf entsteht und wirkt. Heidelberg; Berlin: Spektrum, Akad. Verl., 1998

Kaga M, Shindo M, Kaga K: Long-term follow-up of auditory agnosia as a sequel of herpes encephalitis in a child. *J Child Neurol* 2000; 15(9): 626-9

Kahle, Werner: Nervensystem und Sinnesorgane, aus Kahle W, Leonhardt H, Platzer: Taschenatlas der Anatomie Bd.3, Thieme Stuttgart 2000, 7.Auflage, Seite 238 und 306

Kidd G, Boltz M, Jones MR: Some effects of rhythmic context on melody recognition. *Am J Psychol* 1984; 97(2):153-73

Krumhansl CL: Rhythm and Pitch in Music Cognition. *Psychol Bull* 2000; 126(1):159-79

Lauter JL, Formby C, Fox PT, Herscovitch, Raichle ME: Tonotopic organisation in human auditory cortex as revealed by regional changes in cerebral blood flow. *J Cereb Blood Flow Metabol* 1983; 3 Suppl. 1: S248-S249

Lauter JL, Herscovitch P, Formby C, Raichle ME: Tonotopic organisation in human auditory cortex revealed by positron emission tomography. *Hear Res* 1985; 20: 199-205

Licklider JCR, Kryter KD: Frequency-localization in the auditory cortex of the monkey. *Fed. Proc.* 1942; 1, 51

Massaro DW, Kallman HJ, Kelly JL: The role of tone height, melodic contour, and tone chroma in melody recognition. *J Exp Psychol (Hum Learn)* 1980; 6(1): 77-90

Mavlov L: Amusia due to rhythm agnosia in a musician with left hemisphere damage: a non-auditory supramodal defect. *Cortex* 1980; 16: 331-8

Mazziota JC, Phelps ME, Carson RE, Kuhl DE: Tomographic mapping of human cerebral metabolism: auditory stimulation. *Neurol* 1982; 32: 921-937

Mendez MF, Geehan GR: Cortical auditory disorders: Clinical and psychoacoustic features. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1988; 51: 1-9

Mohneke R: Tonotopic organization of the auditory midbrain nuclei of the midwife toad (*Alytes obstetricans*). *Hear Res* 1983; 9(1): 91-102

Moonen CTW, Zijl van PCW, Frank JA, Le Bihan D, Becker ED: FMRI in medicine and physiology. *Science* 1990; 250(4977): 53-61

Moonen CTW: Imaging of human brain activation with fMRI. *Biol Psychiatry* 1995; 37(3): 141-3

Morel A, Garraghty PE, Kaas JH: Tonotopic organization, architectonic fields and connections of auditory cortex in macaque monkeys. *J Comput Neurol* 1993; 335: 437-459

Münste TF, Schuppert M, Johannes S, Wieringa BM, Kohlmetz, Altenmüller E: Brain potentials in patients with music perception deficits: evidence for an early locus. *Neurosci lett* 1998; 256(2): 85-88

Ogawa S, Lee TM, Kay AR, Tank DW: Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci USA* 1990; 87: 9868-72, Biophysics

Pantev C, Oostenveld R, Engelien A, Ross B, Roberts LE, Hoke M: Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature* 1998; 392: 811-14.

Patel AD, Peretz I, Tramo M, Labreque R: Processing prosodic and musical patterns: a neuropsychological investigation. *Brain Lang* 1998; 61(1): 123-44

Penfield W, Jasper HH: *Epilepsy and the functional anatomy of the human brain*. Little, Brown and Co., Boston 1954: pp 896

Penhune VB, Zatorre RJ, Evans AC: Cerebellar contributions to motor timing: a PET study of auditory and visual rhythm reproduction. *J Cogn Neurosci* 1998; 10(6): 752-65

Peretz I, Kolinsky R, Tramo M, Labrecque R, Hublet C, Demeurisse G, Belleville S: Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. *Brain* 1994; 117: 1283-1301

Peretz I, Kolinsky R: Boundaries of separability between melody and rhythm in music discrimination: a neuropsychological perspective. *Q J Exp Psychol A* 1993; 46(2): 301-25

Peretz I: Processing of local and global musical information by unilateral brain-damaged patients. *Brain* 1990; 113: 1185-205

Piccirilli M, Sciarra T, Luzzi S: Modularity of music: evidence from a case of pure amusia. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2000; 69(4): 541-5

Platel H, Price C, Baron, Wise R, Lambert J, Frackowiak RSJ, Lechevalier B, Eustache F: The structural components of music perception. A functional anatomical study. *Brain* 1997; 120: 229-43

Povel DJ: Internal representation of simple temporal patterns. *J Exp Psychol (Hum Percept Perform)* 1981; 7: 3-18

Rao SM, Mayer AR, Harrington DL: The evolution of brain activation during temporal processing. *Nat Neurosci* 2001; 4(3): 317-23

Reale RA, Imig TJ: Tonotopic organization in auditory cortex of the cat. *J Comput Neurol* 1980; 192(2): 265-91

Romani GL, Williamson SJ, Kaufman L: Tonotopic organization of human auditory cortex. *Science* 1982; 216: 1339-40

Samson S, Zatorre RJ: Contribution of the right temporal lobe to musical timbre discrimination. *Neuropsychologia* 1994; 32(2); 231-40

Schlaug G, Jancke L, Huang Y, Staiger JF, Steinmetz H.: Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 1995; 33(8):1047-55 (2)

Schlaug G, Jancke L, Huang Y, Steinmetz H.: In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science* 1995 Feb 3; 267(5198):699-701 (1)

Schratzenstaller B, Janssen T, Alexiou C, Arnold W: Confirmation of G. von Békésy's theory of paradoxical wave propagation along the cochlear partition by means of bone-conducted auditory brainstem responses. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 2000; 62(1):1-8

Schuppert M, Münte TF, Altenmüller E: Störungen der Musikwahrnehmung nach einseitiger Großhirnschädigung. *Musikphysiologie und Musiktherapie* 1997; 4(2): 31-43

Schuppert M, Münte TF, Wieringa BM, Altenmüller E: Receptive amusia: evidence for cross-hemispheric neural networks underlying music processing strategies. *Brain* 2000; 123 Pt 3: 546-59

Sergent J: Mapping the musician brain. *Hum Brain Mapp* 1993; 1: 20-38 (1)

Sergent J: Music, the brain and Ravel. *Trends Neurosci* 1993; 16: 168-72 (2)

Shapleske J, Rossell SL, Woodruff RW, David AS: The planum temporale: a systematic, quantitative review of its structural, functional and clinical significance. *Brain Res Brain Res Rev* 1999; 29(1): 26-49

Strohmann B, Schwarz DW, Puil E: Electrical resonances in central auditory neurons. *Acta Otolaryngol* 1995; 115(2): 168-72

Talairach J, Tournoux P: *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. 1988
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, Germany

Taniwaki T, Tagawa K, Sato F, Iino K: Auditory agnosia restricted to environmental sounds following cortical deafness and generalized auditory agnosia. *Clin Neurol Neurosurg* 2000; 102(3): 156-62

Tonndorf J: In defense of the travelling wave concept. *J Otolaryngol* 1980; 9(4): 316-28

Tramo MJ, Bharucha JJ, Musiek FE: Music perception and cognition following bilateral lesions of auditory cortex. *J Cogn Neurosci* 1990, 2(3): 195-212

Vollmer-Haase J, Finke K, Hartje W, Bulla-Hellwig M: Hemispheric dominance in the processing of J.S. Bach fugues: a transcranial Doppler sonography (TCD) study with musicians. *Neuropsychologia* 1998; 36(9): 857-867

Walzl EM, Woolsey CN: Cortical auditory areas of the monkey as determined by electrical stimulation of nerve fibers in osseous spiral lamina and by click stimulation. *Fed. Proc.* 1943; 2, 52

Wernicke C: In: *Der aphasische Symptomenkomplex*. 1874 (Cohn M, Weigert, Hrsg.)
Breslau, Polen

Wessinger CM, Buonocore MH, Kussmaul CL, Mangun GR: Tonotopy in human auditory cortex examined with functional magnetic resonance imaging. *Hum Brain Mapp* 1997; 5: 18-25

Wessinger CM, VanMeter J, Tian B, Van Lare J, Pekar J, Rauschecker JP: Hierarchical organization of the human auditory cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *J Cogn Neurosci* 2001 Jan 1; 13(1): 1-7

Woolsey CN: Tonotopic organization of the auditory cortex. In: *Physiology of the Auditory System*. MB Sachs ed. National Educational Consultants, Baltimore; 1971: pp.271-82

Zatorre RJ, Halpern AR: Effect of unilateral temporal-lobe excision on perception and imagery of songs. *Neuropsychologia* 1993; 31(3): 221-232

Zatorre RJ: Pitch perception of complex tones and human temporal-lobe function. *J Acoust Soc Am* 1988; 84: 566-572

Zatorre RJ, Evans AC, Meyer E: Neuronal mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *J Neurosci* 1994; 14: 1908-19

9. Anhang

9.1 Notenbeispiele

1. Melodie im Original (M 1), in Anlehnung an D. Schostakovich
Sinfonie Nr. 7 „Leningrader Sinfonie“ Erster Satz.

The musical notation is presented in three systems, each with a treble and bass staff. The key signature has one sharp (F#) and the time signature is 4/4. Measure numbers 10 through 18 are indicated above the treble staff.

- System 1 (Measures 10-12):** Measure 10: Treble has a quarter note D4, eighth notes E4 and F#4, and a quarter rest; Bass has a whole rest. Measure 11: Treble has a quarter note G4, eighth notes A4 and B4, and a quarter rest; Bass has a quarter note D4, eighth notes E4 and F#4, and a quarter rest. Measure 12: Treble has a quarter note C5, eighth notes B4 and A4, and a quarter rest; Bass has a whole rest.
- System 2 (Measures 13-15):** Measure 13: Treble has a quarter note B4, eighth notes A4 and G4, and a quarter rest; Bass has a whole rest. Measure 14: Treble has a quarter note A4, eighth notes G4 and F#4, and a quarter rest; Bass has a whole rest. Measure 15: Treble has a quarter note G4, eighth notes F#4 and E4, and a quarter rest; Bass has a whole rest.
- System 3 (Measures 16-18):** Measure 16: Treble has a quarter note F#4, eighth notes E4 and D4, and a quarter rest; Bass has a whole rest. Measure 17: Treble has a quarter note E4, eighth notes D4 and C#4, and a quarter rest; Bass has a quarter note D4, eighth notes C#4 and B4, and a quarter rest. Measure 18: Treble has a quarter note D4, eighth notes C#4 and B4, and a quarter rest; Bass has a whole rest. The system ends with a double bar line.

2. Melodie neu, Rhythmus wie im Original (M 2)

Exercise 2 consists of three systems of musical notation, each with a treble and bass staff. The key signature has one sharp (F#) and the time signature is 4/4. The first system contains measures 19, 20, and 21. The second system contains measures 22, 23, and 24. The third system contains measures 25, 26, and 27. The melody is written in the treble staff, and the bass staff contains a simple accompaniment pattern of eighth notes.

3. Melodie wie im Original, Rhythmus neu (M 3)

Exercise 3 consists of three systems of musical notation, each with a treble and bass staff. The key signature has one sharp (F#) and the time signature is 4/4. The first system contains measures 28, 29, and 30. The second system contains measures 31, 32, and 33. The third system contains measures 34, 35, and 36. The melody is written in the treble staff, and the bass staff contains a simple accompaniment pattern of eighth notes.

4. Melodie und Rhythmus randomisiert (M 4)

Handwritten musical score for exercise 4, measures 37-45. The score is written in 4/4 time and consists of three systems, each with a treble and bass staff. The key signature has one sharp (F#). The melody is randomised, and the rhythm is also randomised. The bass line is mostly silent, with some rhythmic patterns in measures 37, 38, 43, and 44.

Measures 37-39: Treble staff shows a melodic line with eighth and sixteenth notes. Bass staff shows a rhythmic pattern of eighth notes.

Measures 40-42: Treble staff shows a melodic line with eighth and sixteenth notes. Bass staff is mostly silent.

Measures 43-45: Treble staff shows a melodic line with eighth and sixteenth notes. Bass staff shows a rhythmic pattern of eighth notes.

9.2 Verzeichnis der akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer an der Philipps-Universität Marburg waren die Damen und Herren Universitätsprofessoren:

Arnold, Aumüller, Aurich, Austermann, Aziz, Basler, Bauer, Baum, Beato, Berendes, Berger, Berndt, Bertalanffy, Besedowsky, Bien, Blankenburg, Braasch, Cetin, Czubayko, Daume, Daut, Dibbets, Dittrich, Dombrowski, Doss, Egbring, Eilers, Engel, Engenhardt-Cabillic, Eschenbach, Feuser, Flores de Jacoby, Friedrich, Fruhstorfer, Fuhrmann, Ganz, Garten, Gemsa, Geus, Göke, Golenhofen, Gotzen, Graul, Gressner, Griss, Gröne, Grundner, Grzeschik, Habermehl, Happle, Hardewig, Hartmann, Hasilik, Havemann, Hebebrand, Heeg, Hering, Heß, Hildebrand, Hilgermann, Hoffmann, Huffmann, Ihm, Jones, Joseph, Kälble, Kaffarnik, Kalbfleisch, Karlson, Katschinski, Kern, Kleine, Kleinsasser, Klenk, Klötzer, Klose, Knoll, Koecke, Koolmann, Koransky, Kraft, Krause, Kretschmer, Krieg, Krieglstein, Kroll, Küster, Kuhn, Kuni, Kußmann, Lang, Lange, Lauer, Lehmann, Lennartz, Lill, Lorenz, Lotzmann, Ludwig, Lührmann, Lütcke, Maisch, Martini, Mannheim, Massarat, Mennel, Moll, Moosdorf, Mueller, Müller, Netter, Neurath, Niemeyer, Niessing, Oepen, Oertel, Petry, Pfab, Pieper, Podszus, Pohlen, Portig, Radsak, Rehder, Remschmidt, Richter, Riedmiller, Rinze, Rothmund, Schachtschabel, Schäfer, Schiff, Schmidt, Schmitz-Moormann, Schneider, Schüffel, Schulz, Schwarz, Schwerk, Seifart, Seitz, Seyberth, Siegrist, Slenczka, Steiniger, Stempel, Sturm, Sommer, Thomas, Unsicker, Voigt, Wagner, Weber, Weihe, Werner, Wesemann, v.Wichert, Wiegandt und Wolf.

Meine akademischen Lehrer an der University of Michigan in Ann Arbor, Michigan, USA waren die Damen und Herren Universitätsprofessoren: Arts, Bradford, Chepeha, Marentette, Telian und Teknos

9.3 Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Siegfried Bien, der die Idee zu dieser Studie hatte, sie jederzeit unterstützte, mit viel Geduld verfolgte und mich zur damaligen Zeit aus einer mißlichen Situation befreite. Vielen Dank auch an dieser Stelle für die frühmorgentlichen Gespräche an vielen Samstagen in der Klinik und für die Möglichkeit, diese Studie an dem MRT der Klinik für Neuroradiologie durchzuführen.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Frank Rösler für anregende Gespräche über Musik und die Unterstützung dieser Doktorarbeit. Es war eine sehr schöne und reichhaltige Erfahrung in Ihrer Abteilung und Arbeitsgruppe Gast sein zu dürfen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Brigitte Röder für ihre kreative und geduldige Unterstützung. Ich weiß es ist nicht immer leicht mit Medizinerinnen, aber ich kann nur sagen, daß mir die Zusammenarbeit mit Dir sehr viel Spaß gemacht hat und ich Dein wissenschaftliches und organisatorisches Talent sowie Deinen unermüdlichen Einsatz für die Sache und Deinen Humor maßlos bewundere. Oft war es auch anstrengend, daher danke ich Dir noch einmal für Deine geopfert Zeit an so vielen Samstagen, an denen wir die Messungen durchführten.

Ein herzlicher Dank auch an dieser Stelle an die gesamte Arbeitsgruppe der Abteilung für Kognitive und Biologische Psychologie der Universität Marburg. Ich habe mich sehr wohl und integriert gefühlt, auch wenn ich seit der AiP Zeit nur noch seltener Gast in Marburg war. Besonders möchte ich mich aber noch bei Dipl. Psych. Oliver Stock bedanken, der mit hilfreichem Rat und Tat bzgl. Brain-Voyager immer zur Verfügung stand. Vielen Dank noch einmal dafür Oliver!

Mein weiterer Dank geht an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Neuroradiologie, darunter vor allen Herrn Dr. Obert für die Ansprechbarkeit bei allerlei Hardwareproblemen.

Außerdem vielen Dank an meinen Kodoktoranden Dr. Ingo Fleischer für seine gute Laune und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ein wichtiger Punkt sind noch die Probanden. Ich danke allen Mitgliedern des Studenten-Sinfonie-Orchesters Marburg und meinen Freunden, die an dieser Studie – teilweise extrem spontan – teilgenommen haben. Ohne Probanden wäre diese Studie hinfällig gewesen! Von daher vielen lieben Dank an Euch!

Dr. Bernd Sengpiel sei herzlich gedankt für viele hilfreiche Tips und seine Loyalität als Freund und Kommilitone. Frau Dr. Maike Preis und Frau Marlou Häfner sei herzlich gedankt für das Lesen und Korrigieren des Manuskriptes. Ebenso der Gattin meines Doktorvaters, Frau Bien.

Ein großes Dankeschön geht auch an alle Lehrer, Chorleiter, Dirigenten und Orchester die meinen musikalischen Weg begleitet und gefördert haben. Allen voran Herrn Kantor Günther Treeck, Herrn KMD Gotthard Gerber, Herrn Kantor Herbert Gebker, Herrn LKMD Martin Bartsch, Frau Elisabeth Marschner, Herrn Andreas Gosling, Herrn Prof. Feit, Herrn Prof. Thomas Ungar, Herrn GMD Welisar Gentscheff, dem Märkischen Jugendsinfonieorchester, dem Landes-Jugendorchester NRW, der Luther-Kantorei Altena, der Evangelischen Kantorei Iserlohn und der Kurhessischen Kantorei Marburg.

Ein lieber Dank für die Hilfe bei der letzten Überarbeitung dieser Dissertation geht an Timo Lehniger.

Letztlich danke ich von ganzem Herzen meiner gesamten Familie, vor allem meiner Mutter, die durch alle Zeiten meines Studiums und meiner Ausbildung für mich da war und mich nach Kräften unterstützt hat. Ohne Dich wäre ich nicht dort wo ich jetzt bin. Ich danke meinem Vater und meinen Großeltern für ihren herzlichen und konstanten Beistand. Und Sven für seine Geduld und seine vielen Ermutigungen.